BIBLIOTECA DE
FILOSOFIA

FUNDAMENTACION LOGICA DE LA FISICA

Rudolf Carnap

EDITORIAL SUDAMERICANA

BIBLIOTECA DE FILOSOFÍA
DIRIGIDA POR EZEQUIEL DE OLASO

RUDOLF CARNAP

FUNDAMENTACIÓN LÓGICA DE LA FÍSICA

Traducción de
Néstor Miguens

EDITORIAL SUDAMERICANA
BUENOS AIRES

PRINTED IN ARGENTINA
IMPRESO EN LA ARGENTINA
Queda hecho el depósito que previene la ley 11.723.

TÍTULO DEL ORIGINAL EN INGLÉS:
"PHILOSOPHICAL FOUNDATIONS OF PHYSICS"

PREFACIO

Este libro surgió de un Seminario que he dado muchas veces, de contenido y forma variables. Se lo llamó "Fundamentos Filosóficos de la Física" o "Conceptos, Teorías y Métodos de las Ciencias Físicas". Aunque el contenido cambiaba a menudo, el punto de vista filosófico general permanecía constante; en el curso se daba énfasis al análisis lógico de los conceptos, enunciados y teorías de la Ciencia, no en la especulación metafísica.

La idea de presentar la esencia de mis charlas (informales) del Seminario en un libro fue sugerida por Martin Gardner, quien había asistido a mi curso de 1946 en la Universidad de Chicago. En 1958, indagó si existía o si podía realizarse una copia a máquina del Seminario; en caso de que así fuera, ofrecía llevar a cabo su publicación. Nunca hice copiar a máquina mis conferencias o seminarios, ni deseaba dedicar tiempo a ello. Sucedió justamente, en ese momento, que se anunció este curso para el semestre siguiente, en el otoño de 1958, en la Universidad de California, en Los Angeles. Se sugirió que se grabaran mis charlas y las discusiones. Consciente de la enorme distancia que hay entre la palabra hablada y una formulación adecuada para la publicación, al principio abrigué cierto escepticismo acerca del plan. Pero mis amigos me urgieron a aceptarlo porque no habían sido publicadas muchas de mis ideas sobre problemas de la filosofía de la ciencia. El estímulo decisivo provino de mi esposa, quien se ofreció para grabar todo el curso del semestre y transcribirlo. Así lo hizo, y también me prestó una inapreciable ayuda en las últimas etapas del proceso de elaboración. Este libro, pues, le debe mucho; lamentablemente, no vivió para verlo publicado.

Se le envió una versión corregida de la transcripción a Martin Gardner. Éste comenzó entonces su difícil tarea, que realizó con gran habilidad y sensibilidad. No sólo pulió el estilo, sino que también halló maneras de facilitar la lectura reordenando algunos de los temas y mejorando los ejemplos o contribuyendo con nuevos ejemplos. Los capítulos de la obra fueron y vinieron varias veces. De vez en cuando, yo hacía extensos cambios o adiciones, o sugería a Gardner que los hiciera. Aunque el seminario estaba destinado a estudiantes graduados en filosofía, de nivel avanzado, familiarizados con la lógica simbólica y que tenían algún conocimiento de la matemática y la física de nivel universitario, decidimos hacer el libro accesible a un círculo más amplio de lectores. Redujimos considerablemente el número de fórmulas lógicas, matemáticas y físicas, mientras que explicamos las restantes cuando parecía aconsejable.

En este libro no se hace ningún intento por ofrecer un tratamiento sistemático de todos los problemas importantes de la fundamentación filosófica de la física. En mi seminario —y, por lo tanto, también en el libro— he preferido limitarme a un número pequeño de problemas fundamentales (indicados por los títulos de las seis partes del libro) y examinarlos de manera más completa en lugar de incluir un examen superficial de muchos otros temas. La mayoría de los temas tratados en este libro (excepto en la parte III, que trata de geometría, y en el Capítulo 30, sobre la física cuántica) son atinentes a todas las ramas de la ciencia, incluyendo las ciencias biológicas, la psicología y las ciencias sociales. Por esta razón creo que este libro puede también servir como introducción general a la filosofía de la ciencia.

Mi primer agradecimiento va dirigido a mi fiel y eficiente colaborador Martin Gardner. Le agradezco su excelente labor y también su inagotable paciencia cuando yo tardaba mucho en devolverle algunos capítulos o solicitaba que se hicieran aun más cambios.

Quiero agradecer a mis amigos Herbert Feigl y Carl G. Hempel por las sugerentes ideas que me expusieron en conversaciones sostenidas durante muchos años y, especialmente, por sus útiles comentarios acerca de algunas partes del manuscrito. Agradezco a Abner Shimony por su generosa ayuda en lo concerniente a la mecánica cuántica. Además, agradezco a muchos amigos y colegas su estimulante influencia, así como a aquellos de mis alumnos que oyeron una u otra versión de este seminario y cuyas preguntas y comentarios inspiraron algunos de los análisis que se efectúan en este libro.

[Deseo expresar, asimismo, mi agradecimiento a Yale University Press por permitirme hacer extensas citas del libro de Kurt Riezler Physics and Reality *(1940).]*

RUDOLF CARNAP
Universidad de California
Los Ángeles

Febrero de 1966.

PRIMERA PARTE

LEYES, EXPLICACIONES Y PROBABILIDAD

1

EL VALOR DE LAS LEYES: EXPLICACIÓN Y PREDICCIÓN

Las observaciones que hacemos en la vida cotidiana y las observaciones más sistemáticas de la ciencia revelan ciertas repeticiones o regularidades del mundo. El día sigue siempre a la noche, las estaciones se repiten en el mismo orden, el fuego siempre es caliente, los objetos caen cuando los soltamos, etc. Las leyes de la ciencia son solamente enunciados que expresan estas regularidades de la manera más precisa posible.

Si se observa una cierta regularidad en todo tiempo y en todo lugar, sin excepción, entonces se expresa dicha regularidad en la forma de una "ley universal". Un ejemplo de la vida cotidiana es "el hielo es frío". Este enunciado afirma que cualquier trozo de hielo —en cualquier lugar del universo, en cualquier tiempo, pasado, presente o futuro— es (fue o será) frío. No todas las leyes de la ciencia son universales. En lugar de afirmar que una regularidad se produce en *todos* los casos, algunas leyes afirman que sólo se produce en un cierto porcentaje de casos. Si se especifica el porcentaje o si se formula de alguna otra manera un enunciado cuantitativo acerca de la relación de un suceso con otro, entonces dicho enunciado es llamado una "ley estadística". Por ejemplo, "las manzanas maduras comúnmente son rojas" o "aproximadamente la mitad de los niños que nacen cada año son varones". Ambos tipos de leyes, el universal y el estadístico, son necesarios en la ciencia. Las leyes universales son lógicamente más simples, razón por la cual las consideraremos primero. En la primera parte

de este examen, la palabra "leyes" habitualmente significará leyes universales.

Las leyes universales se expresan mediante la forma lógica de lo que, en la lógica formal, se llama un "enunciado condicional universal". (En este libro haremos uso ocasionalmente de la lógica simbólica, pero sólo de una manera muy elemental.) Por ejemplo, consideremos una ley del tipo más simple posible. Afirma que, sea x lo que fuere, si x es P, entonces x también es Q. Simbólicamente, esto se indica del siguiente modo:

$$(x)\ (Px \supset Qx).$$

La expresión "(x)" de la izquierda es llamada un "cuantificador universal". Nos dice que el enunciado se refiere a *todos* los casos de x, y no a un determinado número de casos. "Px" dice que x es P, y "Qx" dice que x es Q. El símbolo "$\supset$" es un conectivo. Vincula el término que está a la izquierda de él con el término que está a su derecha. En castellano, corresponde aproximadamente a la aserción: "si... entonces...".

Si "x" representa a un cuerpo material, entonces la ley declara que, para todo cuerpo material x, si x tiene la propiedad P, también tiene la propiedad Q. Por ejemplo, en física diríamos: "para todo cuerpo x, si se lo calienta, se dilatará". Esta es la ley de la dilatación térmica en su forma más simple, no cuantitativa. En física, claro está, se trata de obtener leyes cuantitativas y de especificarlas de modo que excluyan excepciones; pero, si dejamos de lado tales refinamientos, entonces este enunciado condicional universal es la forma básica de todas las leyes universales. A veces podemos decir, no sólo que Qx rige cuando rige Px, sino también que es verdadero el caso inverso: cuando rige Qx, también rige Px. Los lógicos llaman a este enunciado un bicondicional, es decir, un enunciado que es condicional en ambos sentidos. Pero, por supuesto, esto no contradice el hecho de que todas las leyes universales con-

dicionales sean universales, porque un bicondicional puede ser considerado como la conjunción de dos condicionales.

No todos los enunciados de los científicos tienen esta forma lógica. Un científico puede decir: "Ayer, en Brasil, el profesor Pérez descubrió una nueva especie de mariposa." Esto no es el enunciado de una ley. Habla acerca de un tiempo y un lugar especificados, y declara que en ese tiempo y lugar se produjo un cierto suceso. Debido a que tales enunciados se refieren a hechos únicos, se los llama enunciados "singulares". Por supuesto, todo nuestro conocimiento halla su origen en enunciados singulares, en las observaciones particulares de individuos particulares. Uno de los problemas importantes y desconcertantes de la filosofía de la ciencia es cómo podemos pasar de tales enunciados singulares a la afirmación de leyes universales.

Cuando los enunciados de los científicos se hallan expresados en el lenguaje común, y no en el lenguaje más preciso de la lógica simbólica, debemos tener mucho cuidado de no confundir los enunciados singulares con los universales. Si un zoólogo escribe en un libro de texto: "el elefante es un excelente nadador", no quiere significar que cierto elefante al cual observó hace un año en un zoológico, es un excelente nadador. Cuando dice "el elefante" está usando "el" en el sentido aristotélico; se refiere a toda la clase de los elefantes. Todas las lenguas europeas han heredado del griego (y quizás también de otras lenguas) esta manera de hablar en singular cuando, realmente, se alude a una clase o tipo. Los griegos decían: "el hombre es un animal racional". Se referían, claro está, a todos los hombres, no a un hombre particular. Análogamente, decimos "el elefante" cuando nos referimos a todos los elefantes o "la tuberculosis se caracteriza por los siguientes síntomas..." cuando nos referimos, no a un caso particular de tuberculosis, sino a todos los casos.

Es lamentable que nuestro lenguaje tenga esta ambigüedad, porque es una fuente de muchos malentendidos. Los

científicos a menudo se refieren a enunciados universales —o, más bien, a lo que expresan tales enunciados— como a "hechos". Olvidan que la palabra "hecho" se aplicaba originalmente a sucesos singulares, particulares (y es este exclusivamente el sentido en el cual la aplicaremos). Si se interroga a un científico acerca de la ley de la dilatación térmica, quizá responda: "¡Ah!, la dilatación térmica. Es uno de los hechos conocidos y básicos de la física." Análogamente, hablamos del hecho de que una corriente eléctrica genera calor, del hecho de que la electricidad produce magnetismo, etcétera. A veces, se los considera "hechos" familiares de la física. Para evitar malentendidos, preferimos no llamar "hechos" a tales enunciados. Los hechos son sucesos particulares. "Esta mañana en el laboratorio hice pasar una corriente eléctrica a través de un solenoide dentro del cual se hallaba un cuerpo de hierro y hallé que éste se hacía magnético." Esto es un hecho, a menos, por supuesto, que yo me haya engañado de alguna manera. Sin embargo, si yo estaba en mis cabales, si no había demasiada bruma en la habitación y si nadie había metido baza en el aparato para hacerme una broma, puedo afirmar como observación fáctica que esta mañana se produjo esa sucesión de acontecimientos.

Cuando usemos la palabra "hecho", lo haremos en el sentido singular para distinguir claramente estos enunciados de los universales. A estos enunciados universales los llamaremos "leyes", aunque sean tan elementales como la ley de la dilatación térmica o aunque sean aun más elementales, como los enunciados del tipo "todos los cuervos son negros". No sé si este enunciado es verdadero, pero, suponiendo que lo sea, llamaremos a tal enunciado una ley de la zoología. Los zoólogos pueden hablar informalmente de "hechos" tales como que "el cuervo es negro" o "el pulpo tiene ocho brazos", pero en nuestra terminología más precisa, los enunciados de este tipo serán llamados "leyes".

Más adelante distinguiremos entre dos tipos de leyes:

empíricas y teóricas. Las leyes del tipo simple que acabamos de mencionar son llamadas, a veces, "generalizaciones empíricas" o "leyes empíricas". Son simples porque hablan de propiedades —como el color negro o las propiedades magnéticas de un trozo de hierro— que pueden ser observadas directamente. La ley de la dilatación térmica, por ejemplo, es una generalización basada en muchas observaciones directas de cuerpos que se dilatan al calentarse. En cambio, los conceptos de entidades teóricas, no observables, como partículas elementales y campos electromagnéticos deben ser tratados mediante leyes teóricas. Examinaremos todo esto más adelante. Lo menciono aquí porque, de lo contrario, el lector podría pensar que los ejemplos que he dado no incluyen el tipo de leyes que quizás haya estudiado en física teórica.

Para resumir, la ciencia comienza con observaciones directas de hechos aislados. No hay otra cosa que sea observable. Una regularidad no es directamente observable, por cierto. Las regularidades se descubren solamente cuando se comparan muchas observaciones. Estas regularidades se expresan mediante enunciados llamados "leyes".

¿Para qué se usan tales leyes? ¿Qué propósitos sirven en la ciencia y en la vida cotidiana? La respuesta es doble: se las usa para *explicar* hechos ya conocidos y para *predecir* hechos aún desconocidos.

Primero, veamos cómo se usan las leyes de la ciencia para las explicaciones. No puede darse ninguna explicación —es decir, nada que merezca el título honorífico de "explicación"— sin referencia, al menos, a una ley. (En los casos simples, hay solamente una ley, pero en los casos más complicados puede haber conjuntos de muchas leyes.) Es importante destacar este punto, porque los filósofos han sostenido a menudo que pueden explicar ciertos hechos de la historia, la naturaleza o la vida humana de alguna otra manera, especificando algún tipo de agente o fuerza al que se hace responsable del suceso que se quiere explicar.

En la vida cotidiana, la anterior es, por supuesto, una forma corriente de explicación. Alguien pregunta: "¿Cómo es que mi reloj, al cual dejé sobre la mesa antes de abandonar la habitación, ya no se encuentra aquí?" Se responde: "Vi a Rodríguez entrar en la habitación y tomarlo." Esta es una explicación de la desaparición del reloj. Quizás no sea considerada una explicación suficiente. ¿Por qué Rodríguez tomó el reloj? ¿Quiso robarlo o sólo pedirlo prestado? Quizás lo tomó con la impresión errónea de que era suyo. El primer interrogante, "¿qué sucedió con el reloj?", fue respondido mediante el enunciado de un hecho: Rodríguez lo tomó. El segundo interrogante "¿por qué lo tomó Rodríguez?", puede recibir respuesta apelando a otro hecho: lo tomó prestado por un momento. Parecería, pues, que no necesitamos leyes para nada. Preguntamos por la explicación de un hecho, y se nos ofrece un segundo hecho. Preguntamos por una explicación del segundo hecho, y se nos ofrece un tercero. Los pedidos de ulteriores explicaciones pueden traer a colación aun otros hechos. ¿Por qué es necesario, entonces, referirse a una ley para dar una explicación adecuada de un hecho?

La respuesta es que las explicaciones por hechos son explicaciones por leyes, disimuladas. Cuando las examinamos más cuidadosamente, descubrimos que son enunciados abreviados e incompletos que presuponen tácitamente ciertas leyes, si bien son leyes tan familiares que es innecesario expresarlas. En el caso del reloj, la primera respuesta, "Rodríguez lo tomó", no sería considerada una explicación satisfactoria si no diéramos por supuesta la ley universal: cuando alguien toma un reloj de una mesa, el reloj ya no se encuentra sobre la mesa. La segunda respuesta, "Rodríguez lo tomó prestado", es una explicación porque damos por supuesta la ley general: si alguien pide un reloj prestado para usarlo en otra parte, toma el reloj y se lo lleva.

Consideremos un ejemplo más. Preguntamos a Juancito

por qué está llorando, y responde con otro hecho: "Pedrito me pegó en la nariz." ¿Por qué consideramos a ésta una explicación suficiente? Porque sabemos que un golpe en la nariz provoca dolor, y que cuando los niños sienten dolor lloran. Son leyes psicológicas generales. Son tan conocidas que hasta Juancito las da por supuestas cuando nos dice por qué estaba llorando. Si se tratara, por ejemplo, de un niño marciano y supiéramos muy poco acerca de las leyes psicológicas marcianas, entonces un simple enunciado de un hecho no sería considerado una explicación adecuada de la conducta del niño. Si los hechos no pueden ser conectados con otros hechos mediante una ley, por lo menos, enunciada explícitamente o entendida tácitamente, no suministran explicaciones.

El esquema general de toda explicación puede ser expresado simbólicamente del siguiente modo:

1. $(x)\ (Px \supset Qx)$
2. Pa
3. Qa

El primer enunciado es la ley universal que se aplica a cualquier objeto x. El segundo enunciado afirma que un objeto particular a tiene la propiedad P. Estos dos enunciados tomados conjuntamente nos permiten deducir lógicamente el tercer enunciado: el objeto a tiene la propiedad Q.

En la ciencia, como en la vida cotidiana, no siempre se enuncia explícitamente la ley universal. Si se le pregunta a un físico: "¿Por qué esta barra de hierro, que hace un momento encajaba exactamente en el aparato, ahora es demasiado larga para encajar en él?", puede responder: "mientras usted estuvo fuera de la habitación, yo calenté la barra". Él supone, por supuesto, que usted conoce la ley de la dilatación térmica; de otro modo, para ser comprendido, habría agregado: "y cuando un cuerpo se calienta, el mismo se dilata". La ley general es esencial para su explicación. Pero si usted conoce la ley y si él sabe que usted la conoce,

puede no considerar necesario enunciarla. Por esta razón, las explicaciones, especialmente en la vida cotidiana en la cual se dan por supuestas las leyes de sentido común, a menudo parecen muy diferentes del esquema que he presentado.

A veces al dar una explicación, las únicas leyes conocidas que se aplican son estadísticas, no universales. En tales casos debemos contentarnos con una explicación estadística. Por ejemplo, podemos saber que determinado tipo de hongo es ligeramente tóxico y provoca ciertos síntomas anómalos en el 90 % de quienes lo ingieren. Si un médico encuentra estos síntomas cuando examina a un paciente y éste le informa que ayer comió este tipo particular de hongo, el médico considerará a esto como una explicación de los síntomas, aunque la ley implicada sólo sea estadística. Y realmente, constituye una explicación.

Aunque una ley estadística sólo suministre una explicación sumamente débil, con todo, es una explicación. Por ejemplo, una ley estadística de la medicina puede expresar que el 5 % de las personas que comen determinado alimento presentan ciertos síntomas. Si un médico cita esto como explicación a un paciente que tiene dicho síntoma, el paciente puede no considerarse satisfecho. "¡Qué!, ¿yo soy uno de los del 5 %?" En algunos casos, el médico puede estar en condiciones de suministrar explicaciones adicionales. Puede someter a prueba al paciente para ver si tiene algún tipo de alergia y hallar que es alérgico a este alimento particular. "Si yo lo hubiera sabido", dirá al paciente, "lo hubiera prevenido contra ese alimento. Se sabe que, cuando las personas que tienen tal alergia comen este alimento, en el 97 % de los casos aparecen síntomas como los suyos". Esto puede satisfacer al paciente como una explicación de mayor fuerza. Fuertes o débiles, se trata de genuinas explicaciones. En ausencia de leyes universales conocidas, las explicaciones estadísticas son a menudo el único tipo disponible de explicación.

En el ejemplo que acabamos de dar, las leyes estadísticas son lo máximo que se puede enunciar, porque el conocimiento médico no basta para enunciar una ley universal. Las leyes estadísticas en economía y en otros ámbitos de la ciencia social se deben a una ignorancia similar. Nuestro limitado conocimiento de las leyes psicológicas o de las leyes fisiológicas subyacentes, y de cómo éstas pueden, a su vez, descansar sobre leyes físicas, hace necesario formular en términos estadísticos las leyes de la ciencia social. En la teoría cuántica, sin embargo, nos encontramos con leyes estadísticas que pueden no ser el resultado de la ignorancia, sino que pueden expresar la estructura básica del mundo. El ejemplo más conocido es el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg. Muchos físicos creen que todas las leyes de la física se basan, en última instancia, en leyes fundamentales de carácter estadístico. Si esto es así, tendremos que contentarnos con explicaciones basadas en leyes estadísticas.

¿Qué sucede con las leyes elementales de la lógica implicadas en todas las explicaciones? ¿Cumplen la misma función que las leyes universales sobre las que se basa la explicación científica? No. La razón de esto es que son leyes de un tipo totalmente diferente. Es cierto que las leyes de la lógica y de la matemática pura (no de la geometría física, que es otra cosa) son universales, pero ellas no nos dicen nada acerca del mundo. Simplemente enuncian relaciones que rigen entre ciertos conceptos, no porque el mundo tenga tal o cual estructura, sino sólo porque esos conceptos están definidos de determinada manera.

He aquí dos ejemplos de leyes lógicas simples:

1. Si p y q, entonces p.
2. Si p, entonces p o q.

Estos enunciados no pueden ser puestos en tela de juicio, porque su verdad se basa en los significados de los términos que incluyen. La primera ley simplemente afirma que,

si suponemos que los enunciados *p* y *q* son verdaderos, entonces debemos admitir que el enunciado *p* es verdadero. Esta ley deriva de la manera como se usan "y" y "si... entonces". La segunda ley afirma que, si suponemos que *p* es verdadero, debemos suponer que *p* o *q* es verdadero. Expresada en palabras la ley es ambigua porque la palabra castellana "o" no permite distinguir entre un significado incluyente (uno u otro o ambos) y un significado excluyente (uno u otro, pero no ambos). Para dar precisión a la ley, la expresamos simbólicamente del siguiente modo:

$$p \supset (p \vee q)$$

El símbolo "$\vee$" se entiende como "o" en el sentido incluyente. Es posible indicar más formalmente su significado escribiendo su tabla de verdad. Lo hacemos registrando todas las combinaciones posibles de valores de verdad (verdad o falsedad) de los dos términos conectados por el símbolo, y luego especificando cuáles combinaciones permite el símbolo y cuáles no permite.

Las cuatro combinaciones posibles de valores son:

	p	*q*
1.	verdadero	verdadero
2.	verdadero	falso
3.	falso	verdadero
4.	falso	falso

Se define el símbolo "$\vee$" mediante la regla de que "$p \vee q$" es verdadero en los tres primeros casos y falso en el cuarto. El símbolo "$\supset$", que se expresa aproximadamente en castellano mediante la locución "si... entonces", queda definido de manera precisa diciendo que es verdadero en los casos primero, tercero y cuarto, y falso en el segundo. Una vez que entendemos la definición de cada término en una ley lógica, comprendemos con claridad que la ley debe ser verdadera de una manera que es totalmente

independiente de la naturaleza del mundo. Es una verdad necesaria, una verdad que es válida —como dicen a veces los filósofos— en todos los mundos posibles.

Esto es cierto de las leyes de la matemática tanto como de las leyes de la lógica. Cuando hemos especificado con precisión los significados de "1", "3", "4", "+" y "=", la verdad de la ley "1 + 3 = 4" se desprende directamente de esos significados. Esto sucede aun en los dominios más abstractos de la matemática pura. Por ejemplo, una estructura es llamada un "grupo", si satisface ciertos axiomas que definen un grupo. El espacio euclidiano tridimensional puede ser definido algebraicamente como un conjunto de tríos ordenados de números reales que satisfacen ciertas condiciones básicas. Pero todo esto no tiene nada que ver con la naturaleza del mundo externo. No hay ningún mundo posible en el cual no sean válidas las leyes de la teoría de grupos y de la geometría abstracta de espacios euclidianos tridimensionales, porque estas leyes sólo dependen de los significados de los términos, y no de la estructura del mundo real en el cual vivimos.

El mundo real está sujeto a cambio constante. Hasta las leyes fundamentales de la física pueden variar ligeramente de un siglo a otro, por todo lo que sabemos. Una constante física a la que asignamos un valor fijo puede estar sujeta a vastos cambios cíclicos que aún no hemos observado. Pero tales cambios, por profundos que sean, nunca destruirían la verdad de una sola ley lógica o aritmética.

Suena muy solemne, quizás hasta reconfortante, decir que en este punto, al menos, hemos hallado la certeza. Es verdad que hemos logrado la certeza, pero hemos pagado por ella un precio muy alto. El precio es que los enunciados de la lógica y la matemática no nos dicen nada acerca del mundo. Podemos estar seguros de que tres más uno son cuatro; pero, como esto es válido en todo mundo posible, no nos dice nada acerca del mundo que habitamos.

¿Qué queremos significar por "mundo posible"? Simple-

mente un mundo que puede ser descrito sin contradicción. La expresión incluye mundos de cuentos de hadas y mundos soñados del tipo más fantástico, siempre que sea posible describirlos en términos lógicamente consistentes. Por ejemplo, el lector puede decir: "pienso en un mundo en el cual hay mil sucesos, ni uno más, ni uno menos. El primer suceso es la aparición de un triángulo rojo. El segundo es la aparición de un cuadrado verde. Pero, puesto que el primer suceso era azul y no rojo...". Al llegar a este punto, yo interrumpo. "Pero, hace un momento usted dijo que el primer suceso es rojo. Ahora dice que es azul. Yo no lo entiendo." Quizás he registrado sus palabras en un grabador. Hago volver atrás la cinta para convencerlo de que usted ha incurrido en una contradicción. Si usted persiste en su descripción de este mundo, incluyendo las dos afirmaciones contradictorias, yo tendría que insistir en que usted no describe nada que pueda ser llamado un mundo posible.

Por otra parte, usted puede describir un mundo posible del siguiente modo: "Hay un hombre. Se reduce de tamaño, haciéndose cada vez más pequeño. Repentinamente se convierte en un pájaro. Luego el pájaro se convierte en mil pájaros. Estos pájaros vuelan al cielo, mientras las nubes conversan entre sí acerca de lo que ha sucedido." Este es un mundo posible. Fantástico, sí; pero no contradictorio.

Podríamos decir que los mundos posibles son mundos concebibles, pero trato de evitar el término "concebible" porque a veces se lo usa en el sentido más restringido de "lo que puede ser imaginado por un ser humano". Muchos mundos posibles pueden ser descritos pero no imaginados. Por ejemplo, podríamos considerar un continuo en el cual todos los puntos determinados por coordenadas racionales sean rojos y todos los puntos determinados por coordenadas irracionales sean azules. Si admitimos la posibilidad de asignar colores a los puntos, éste no es un mundo contradictorio. Es concebible en el sentido más amplio;

esto es, se lo puede afirmar sin contradicción. Pero no es concebible en el sentido psicológico. No es posible imaginar siquiera un continuo incoloro de puntos. Sólo podemos imaginar un modelo tosco de un continuo, un modelo consistente en puntos muy cercanos entre sí. Los mundos posibles son mundos concebibles en el sentido más amplio. Son mundos que es posible describir sin contradicción lógica.

Las leyes de la lógica y de la matemática pura, por su naturaleza misma, no pueden ser utilizadas como base de la explicación científica porque no nos dicen nada que permita diferenciar el mundo real de cualquier otro mundo posible. Cuando preguntamos por la explicación de un hecho, de una observación particular en el mundo real, debemos utilizar leyes *empíricas*. Éstas no poseen la certeza de las leyes lógicas y matemáticas pero nos dicen algo acerca de la estructura del mundo.

En el siglo XIX, algunos físicos alemanes, como Gustav Kirchhoff y Ernst Mach, afirmaban que la ciencia no debía preguntar "¿por qué?" sino "¿cómo?". Querían decir con esto que la ciencia no debe buscar agentes metafísicos desconocidos como responsables de ciertos sucesos, sino que debe describir tales sucesos en términos de leyes. Esta prohibición de la pregunta "¿por qué?" debe ser entendida en su encuadre histórico. Su marco de fondo era la atmósfera filosófica alemana de la época, dominada por el idealismo de la tradición de Fichte, Schelling y Hegel. Estos filósofos tenían la sensación de que no bastaba una descripción de cómo se comportaba el mundo. Querían lograr una comprensión más plena, la cual sólo podía obtenerse —según creían— descubriendo causas metafísicas que estuvieran detrás de los fenómenos y no fueran accesibles al método científico. Los físicos reaccionaron contra este punto de vista diciendo: "déjennos tranquilos con sus porqués. No hay ninguna respuesta fuera de la que dan las leyes empíricas". Objetaban esos porqués debido a que, habitualmente, eran preguntas metafísicas.

Hoy la atmósfera filosófica ha cambiado. En Alemania hay algunos filósofos que todavía siguen la tradición idealista, pero en Inglaterra y en los Estados Unidos ésta prácticamente ha desaparecido. Como resultado de ello, ya no nos preocupamos por los porqués. Ya no necesitamos decir "no pregunte por qué", pues en la actualidad, cuando alguien pregunta por qué, suponemos que lo hace en un sentido científico, no metafísico. Simplemente, nos pide que expliquemos algo ubicándolo dentro de un marco de leyes empíricas.

Cuando yo era joven y formaba parte del Círculo de Viena, escribí algunas de mis primeras publicaciones como reacción contra el clima filosófico del idealismo alemán. Como consecuencia de esto, esas publicaciones y las de otros miembros del Círculo de Viena estaban llenas de enunciados prohibitivos similares al que acabo de considerar. Tales prohibiciones deben ser comprendidas con referencia a la situación histórica en la cual nos encontrábamos. En la actualidad, especialmente en los Estados Unidos, raramente lanzamos tales prohibiciones. El tipo de antagonistas que encontramos aquí es de naturaleza diferente, y la naturaleza del antagonista determina la forma en que expresemos nuestras opiniones.

Cuando decimos que, para la explicación de un hecho determinado, es indispensable el uso de una ley científica, lo que queremos excluir especialmente es la tesis de que deben encontrarse agentes metafísicos antes de poder explicar adecuadamente un hecho. En las épocas precientíficas, éste era, naturalmente, el tipo de explicación que se daba habitualmente. En un tiempo se creía que el mundo estaba habitado por espíritus o demonios no directamente observables, pero que *actuaban* haciendo que caiga la lluvia, que fluyan los ríos, que se encienda el relámpago, etc. En todo suceso que se contemplaba, había algo —o, mejor dicho, *alguien*— responsable del mismo. Esto es psicológicamente comprensible. Si un hombre me hace algo que no

me gusta, es natural que lo haga responsable de ello, me enoje y lo golpee. Si una nube me arroja agua, no puedo golpear a la nube, pero puedo dar rienda suelta a mi enojo si hago a la nube, o a algún demonio invisible detrás de la nube, responsable de la lluvia. Puedo lanzar maldiciones contra ese demonio y mostrarle mi puño. Con esto, mi enojo se alivia. Me siento mejor. Es fácil de entender que los miembros de las sociedades precientíficas hallaran satisfacción psicológica en imaginar agentes detrás de los fenómenos de la naturaleza.

Con el tiempo, como sabemos, las sociedades abandonaron sus mitologías, pero a veces los científicos reemplazan los espíritus por agentes que, en realidad, no son muy diferentes. El filósofo alemán Hans Driesch, que murió en 1941, escribió muchos libros sobre filosofía de la ciencia. Originalmente, era un biólogo destacado, famoso por sus trabajos sobre ciertas respuestas de los organismos, entre otras la regeneración de ciertos órganos en los erizos de mar. Cortaba partes de sus cuerpos y observaba en cuáles etapas de su crecimiento y en qué condiciones eran capaces de desarrollar nuevas partes. Su obra científica fue importante y de excelente calidad. Pero Driesch se interesaba también por cuestiones filosóficas, especialmente por las relativas a los fundamentos de la biología, por lo cual llegó a ser profesor de filosofía. En este campo también realizó una excelente labor, pero hay un aspecto de su filosofía que yo y mis amigos del Círculo de Viena no apreciábamos tanto: era su manera de *explicar* procesos biológicos como la regeneración y la reproducción.

En la época en que Driesch realizó su labor biológica, se pensaba que muchas características de los seres vivos no podían hallarse en otras partes. (En la actualidad, se comprende más claramente que hay un continuo que conecta el mundo orgánico con el inorgánico.) Su deseo era explicar estas características organísmicas únicas, por lo cual postulaba lo que él llamaba una "entelequia". Este término fue

introducido por Aristóteles, quien le asignaba un significado especial que no es necesario examinar aquí. Driesch decía, en efecto: "La entelequia es una determinada fuerza específica, la cual hace que los seres vivos se comporten como lo hacen. Pero no debéis concebirla como una fuerza *física*, como la gravedad o el magnetismo. ¡Ah no!, nada de eso."

Las entelequias de los organismos, sostenía Driesch, son de diversos tipos, según la etapa evolutiva del organismo. En los organismos primitivos, unicelulares, la entelequia es más bien simple. A medida que ascendemos en la escala evolutiva, a través de las plantas, los animales inferiores y los animales superiores, para llegar finalmente al hombre, la entelequia se hace cada vez más compleja. Esto se revela en el mayor grado en el cual se integran los fenómenos en las formas superiores de vida. Lo que llamamos la "mente" de un cuerpo humano en realidad no es nada más que una parte de la entelequia de la persona. La entelequia es mucho más que la mente o, al menos, más que la mente consciente, porque es responsable de todo lo que hace cada célula del cuerpo. Si yo me corto el dedo, las células del dedo forman un nuevo tejido y llevan a la herida sustancias para matar a las bacterias que penetran en ella. Estos sucesos no se hallan conscientemente dirigidos por la mente. Se producen en el dedo de un bebé de un mes de vida, que no sabe nada de las leyes de la fisiología. Todo esto, insistía Driesch, se debe a la entelequia del organismo, de la cual la mente sólo es *una* manifestación. Además de la explicación científica, pues, Driesch tenía una elaborada teoría de la entelequia que ofrecía como explicación *filosófica* de fenómenos no explicados científicamente, tales como la regeneración de ciertas partes de los erizos de mar.

¿Es ésta una explicación? Yo y mis amigos sostuvimos algunas discusiones con Driesch acerca de esta cuestión. Recuerdo una que se realizó en el Congreso Internacional de Filosofía reunido en Praga en 1934. Hans Reichenbach

y yo criticamos la teoría de Driesch, mientras que él y otros la defendían. En nuestras publicaciones no dimos mucho espacio a esta crítica porque admirábamos la labor realizada por Driesch en biología y en filosofía. Se diferenciaba radicalmente de la mayoría de los filósofos alemanes en que realmente quería elaborar una filosofía científica. Pero nos parecía que a su teoría de la entelequia le faltaba algo.

Lo que le faltaba era esto: la comprensión de que no es posible dar una explicación sin dar también una ley.

Le decíamos: "No sabemos qué quiere significar usted con su entelequia. Usted dice que no es una fuerza física. ¿Qué es, entonces?"

Él nos respondía (parafraseo sus palabras, claro está): "Bueno, no debéis adoptar una actitud tan estrecha. Cuando le pedís a un físico una explicación de por qué este clavo se mueve hacia esa barra de hierro, él os dirá que la barra de hierro es un imán y que el clavo es atraído hacia ella por la fuerza del magnetismo. Nadie ha visto nunca el magnetismo. Sólo veis el movimiento de un pequeño clavo hacia una barra de hierro."

Admitíamos: "Sí, tiene usted razón. Nadie ha visto el magnetismo."

"Ya veis", continuaba, "el físico introduce fuerzas que nadie puede observar —fuerzas como el magnetismo y la electricidad— para explicar ciertos fenómenos. Yo quiero hacer lo mismo. Las fuerzas físicas no son adecuadas para explicar ciertos fenómenos orgánicos; por eso yo introduzco algo que es semejante a una fuerza, pero que no es una fuerza física porque no actúa como actúan las fuerzas físicas. Por ejemplo, no está localizada espacialmente. Es cierto que actúa sobre un organismo físico, pero actúa sobre todo el organismo, no sobre ciertas partes de él. Por lo tanto, no se puede decir dónde está ubicada. No tiene locación. No es una fuerza física, pero es tan legítimo que yo la introduzca como lo es que el físico introduzca la fuerza invisible del magnetismo".

Nuestra respuesta era que el físico no explica el movimiento del clavo hacia la barra simplemente introduciendo la palabra "magnetismo". Claro que si se le pregunta por qué se mueve el clavo, puede responder en un principio diciendo que ello se debe al magnetismo; pero si lo apuráis a dar una explicación más detallada, os dará leyes. Las leyes pueden no estar expresadas en términos cuantitativos como las ecuaciones de Maxwell, que describen campos magnéticos; pueden ser leyes simples, cualitativas, *sin que* aparezcan números en ellas. El físico puede decir: "Todos los clavos que contienen hierro son atraídos a los extremos de las barras imanadas." Puede continuar explicando el estado de imanación dando otras leyes no cuantitativas. Puede deciros que el mineral de hierro de la ciudad de Magnesia (se recordará que la palabra "magnético" deriva de la ciudad griega de Magnesia, en la cual se halló por primera vez mineral de hierro de este tipo) posee esta propiedad. Puede explicar que las barras de hierro se imanan si se las frota de cierta manera con minerales magnéticos naturales. Puede dar otras leyes acerca de las condiciones en las cuales ciertas sustancias pueden imanarse y leyes acerca de los fenómenos asociados con el magnetismo. Puede deciros que si imanáis una aguja y la suspendéis de su punto medio, de modo que oscile libremente, uno de los extremos señalará hacia el Norte. Si tenéis otra aguja magnética, podéis acercar los dos extremos que señalan hacia el Norte y observar que no se atraen, sino que se repelen. El científico puede explicar que si calentáis una barra imanada de hierro o si la golpeáis con un martillo, perderá fuerza magnética. Todas estas son leyes cualitativas que pueden ser expresadas en la forma lógica "si... entonces..." Lo que quiero destacar aquí es lo siguiente: para dar una explicación, no basta introducir simplemente un nuevo agente dándole un nuevo nombre. Es necesario también dar leyes.

Driesch no daba leyes. No especificaba en qué difería la entelequia de un roble de la de una cabra o una jirafa.

No clasificaba sus entelequias. Simplemente clasificaba organismos y decía que cada uno de éstos tenía su propia entelequia. No formulaba leyes que expresaran las condiciones en las cuales una entelequia se refuerza o se debilita. Por supuesto, describía toda suerte de fenómenos orgánicos y daba reglas generales acerca de tales fenómenos. Decía que si cortáis un miembro de un erizo de mar de cierta manera, el organismo no sobrevivirá; si lo cortáis de otra manera, el organismo sobrevivirá, pero sólo desarrollará un miembro fragmentario. Si lo cortáis aun de otra manera y en determinada etapa del crecimiento del erizo de mar, regenerará un miembro nuevo y completo. Estos enunciados son todos leyes zoológicas absolutamente respetables.

Preguntábamos a Driesch: "¿Qué agrega usted a estas leyes empíricas si, después de formularlas, usted nos dice que todos los fenómenos que abarcan esas leyes se deben a la entelequia del erizo de mar?"

Nosotros creíamos que no se agregaba nada. Puesto que la noción de entelequia no nos brinda nuevas leyes, no explica más de lo que explican las leyes generales ya disponibles. No nos ayuda en lo mínimo a hacer nuevas predicciones. Por estas razones, no podemos decir que nuestro conocimiento científico haya aumentado. El concepto de entelequia puede ofrecer la apariencia, en un principio, de que agrega algo a nuestras explicaciones; pero cuando lo examinamos más profundamente, vemos su vaciedad. Es una seudoexplicación.

Podría argüirse que el concepto de entelequia no carece de utilidad si brinda al biólogo una nueva orientación, un nuevo método para ordenar leyes biológicas. Nuestra respuesta es que sería útil realmente, si por medio de él pudiéramos formular leyes más generales que las que podían formularse antes. En la física, por ejemplo, el concepto de energía desempeñó un papel semejante. Los físicos del siglo XIX especulaban acerca de la posibilidad de que ciertos fenómenos, como la energía cinética y la energía potencial

en la mecánica, el calor (esto sucedía antes del descubrimiento de que el calor es simplemente la energía cinética de las moléculas), la energía de los campos magnéticos, etc., fueran manifestaciones de un tipo básico de energía. Esto condujo a experimentos en los que se demostró que la energía mecánica puede ser trasformada en calor y el calor en energía mecánica, pero que la cantidad de energía permanece constante. Así, el de energía fue un concepto fructífero porque condujo a leyes más generales, como la ley de la conservación de la energía. Pero la entelequia de Driesch no era un concepto fructífero en este sentido. No condujo al descubrimiento de leyes biológicas más generales.

Además de suministrar *explicaciones* de los hechos observados, las leyes de la ciencia también suministran un medio para *predecir* nuevos hechos aún no observados. El esquema lógico de la predicción es exactamente el mismo que el esquema subyacente en la explicación. Como se recordará, expresado simbólicamente, este esquema era:

1. $(x)\ (Px \supset Qx)$
2. Pa
3. Qa

Primero, tenemos una ley universal: para todo objeto x, si tiene la propiedad P, entonces tiene también la propiedad Q. Segundo, tenemos un enunciado según el cual el objeto a tiene la propiedad P. Tercero, deducimos mediante la lógica elemental que el objeto a tiene la propiedad Q. Este esquema es igual en la explicación y en la predicción; la situación sólo es diferente en lo que respecta al conocimiento. En la explicación el hecho Qa ya es conocido. Explicamos Qa mostrando cómo se lo puede deducir de los enunciados 1 y 2. En la predicción, Qa es un hecho *aún no conocido.* Tenemos una ley y tenemos el hecho Pa. Y concluimos que Qa también debe ser un hecho, aunque no haya sido observado todavía. Por ejemplo, conozco la ley de la dilatación térmica. También sé que he calentado una barra determi-

nada. Aplicando la lógica de la manera indicada en el esquema, infiero que si ahora mido la barra, hallaré que es más larga que antes.

En la mayoría de los casos, el hecho desconocido es realmente un suceso futuro (por ejemplo, un astrónomo predice el momento del próximo eclipse de sol); esta es la razón por la cual reservo el término "predicción" para este segundo uso de las leyes. Pero no es necesario que sea una predicción en sentido literal. En muchos casos, el hecho desconocido es simultáneo con el hecho conocido, como en el caso de la barra calentada. La dilatación de la barra se produce al mismo tiempo que el calentamiento. Es sólo nuestra observación de la dilatación la que se produce después de nuestra observación del calentamiento.

En otros casos, el hecho desconocido hasta puede estar en el pasado. Sobre la base de leyes psicológicas, junto con ciertos hechos deducidos de documentos históricos, un historiador infiere ciertos hechos desconocidos de la historia. Un astrónomo puede inferir que en determinada fecha pasada debe haberse producido un eclipse de luna. A partir de estriaciones en cantos rodados un geólogo puede inferir que en una época pasada cierta región debe haber estado cubierta por glaciares. Uso el término "predicción" para todos los ejemplos porque en todos los casos encontramos el mismo esquema lógico y la misma situación en lo relativo al conocimiento: un hecho conocido y una ley conocida a partir de los cuales se deduce un hecho desconocido.

En muchos casos, la ley en cuestión puede ser estadística y no universal. Entonces, la predicción sólo será probable. Un meteorólogo, por ejemplo, tiene que habérselas con una mezcla de leyes físicas exactas y leyes estadísticas variadas. No puede afirmar que mañana lloverá; sólo puede afirmar que es muy probable que llueva.

Esta incertidumbre es también característica de la predicción de la conducta humana. Sobre la base de ciertas leyes psicológicas de naturaleza estadística y ciertos hechos

conocidos acerca de una persona, podemos predecir cómo se comportará, con diversos grados de probabilidad. Si preguntamos a un psicólogo qué efecto tendrá un cierto suceso sobre nuestro hijo, quizás nos responda: "Tal como veo la situación, su hijo probablemente reaccionará de esta manera. Las leyes de la psicología, por supuesto, no son muy exactas. Es una ciencia joven y todavía sabemos muy poco acerca de sus leyes. Pero sobre la base de lo que se conoce, creo aconsejable que usted planee..." Y nos dará un consejo basado en la mejor predicción que puede hacer, con sus leyes probabilísticas, de la futura conducta de nuestro hijo.

Cuando la ley es universal, entonces interviene la lógica deductiva elemental en la inferencia de hechos desconocidos. Si la ley es estadística, debemos usar una lógica diferente: la lógica de la probabilidad. Para dar un ejemplo simple: una ley enuncia que el 90 % de los residentes de cierta región tienen cabello negro. Sé que determinado individuo es un residente de esa región, pero no conozco el color de su cabello. Sobre la base de la ley estadística puedo inferir que la probabilidad de que su cabello sea negro es 9/10.

La predicción, claro está, es tan esencial para la vida cotidiana como para la ciencia. Hasta los actos más triviales que ejecutamos durante el día se basan en predicciones. Hacemos girar el picaporte. Lo hacemos porque las observaciones pasadas de los hechos, junto con las leyes universales, nos inducen a creer que al hacer girar el picaporte se abrirá la puerta. Podemos no ser conscientes del esquema lógico implicado —sin duda, estamos pensando en otras cosas— pero todas esas acciones deliberadas presuponen dicho esquema. Hay un conocimiento de hechos específicos, un conocimiento de ciertas regularidades observadas, que puede ser expresado en forma de leyes universales o estadísticas y que suministra una base para la predicción de hechos desconocidos. La predicción interviene en todo acto humano que implique una elección deliberada. Sin ella, tanto la ciencia como la vida cotidiana serían imposibles.

II

INDUCCIÓN Y PROBABILIDAD ESTADÍSTICA

En el Capítulo I, supusimos la existencia de leyes de la ciencia. Vimos cómo se usan tales leyes, en la ciencia y en la vida cotidiana para explicar hechos conocidos y para predecir hechos desconocidos. Preguntémonos ahora cómo llegamos a tales leyes. ¿Qué fundamento tenemos para creer que determinada ley es válida? Sabemos, por supuesto, que todas las leyes se basan en la observación de ciertas regularidades. Constituyen un conocimiento indirecto, a diferencia del conocimiento directo de hechos. ¿Qué justificación tenemos para pasar de la observación directa de hechos a una ley que expresa ciertas regularidades de la naturaleza? Este problema es llamado, en la terminología tradicional, "el problema de la inducción".

A menudo se contrapone la inducción a la deducción diciendo que ésta va de lo general a lo específico o singular, mientras que la inducción recorre el camino inverso, va de lo singular a lo general. Pero ésta es una simplificación engañosa. En la deducción hay tipos de inferencia distintos de los que pasan de lo general a lo específico; y en la inducción también hay muchos tipos de inferencia. La distinción tradicional también es engañosa porque sugiere que la inducción y la deducción son simplemente dos ramas de un solo tipo de lógica. La famosa obra de John Stuart Mill, *Sistema de Lógica,* contiene una extensa descripción de lo que él llamaba "lógica inductiva" y formula diversos cánones del procedimiento inductivo. En la actualidad, somos más renuentes a usar la expresión "inferencia inductiva". Si se la usa, debemos comprender que se refiere a un tipo

de inferencia que difiere fundamentalmente de la deducción.

En la lógica deductiva, la inferencia conduce de un conjunto de premisas a una conclusión que es tan cierta como las premisas. Si hay razones para creer en las premisas, se tienen razones igualmente válidas para creer en la conclusión que se desprende lógicamente de ellas. Si las premisas son verdaderas, la conclusión no puede ser falsa. Con respecto a la inducción, la situación es muy diferente. La verdad de una conclusión inductiva nunca es segura. Con esto no quiero decir solamente que la conclusión no puede ser segura porque se base en premisas que es imposible conocer con certeza. Aunque las premisas sean verdaderas y la inferencia sea una inferencia inductiva válida, la conclusión puede ser falsa. Lo más que podemos decir es que, con respecto a las premisas dadas, la conclusión tiene un cierto grado de probabilidad. La lógica inductiva nos enseña a calcular el valor de esta probabilidad. Sabemos que los enunciados singulares acerca de hechos, a los que se llega por la observación, nunca son absolutamente seguros porque podemos cometer errores en nuestras observaciones; pero, en lo que respecta a las leyes, hay una incertidumbre aun mayor. Una ley acerca del mundo declara que, en cualquier caso particular, en cualquier lugar y en cualquier momento, si una cosa es verdadera, otra cosa determinada es verdadera. Evidentemente, esto contiene una referencia a una infinidad de casos posibles. Los casos reales pueden no ser infinitos, pero hay una infinidad de casos posibles. Una ley fisiológica dice que, si se clava un puñal en el corazón de un ser humano, éste morirá. Como nunca se ha observado una excepción a esta ley, se la acepta como universal. Es cierto, por supuesto, que el número de casos observados hasta ahora de puñales clavados en corazones humanos es finito. Es posible que, algún día, la humanidad cese de existir; en este caso, el número de seres humanos, pasados y futuros, es finito. Pero no sabemos si la humanidad dejará de existir. Por lo tanto, debemos afirmar que

hay una infinidad de casos posibles, a todos los cuales cubre la ley. Y si hay una infinidad de casos, ningún número finito de observaciones, por grande que sea, puede dar certidumbre a la ley "universal".

Por supuesto, podemos continuar haciendo observaciones, de la manera más cuidadosa y científica que podamos, hasta que eventualmente lleguemos a afirmar: "Esta ley ha sido sometida a prueba tantas veces que podemos tener completa confianza en su verdad. Es una ley bien establecida y bien fundada." Pero si pensamos en la cuestión, caeremos en la cuenta de que hasta las leyes mejor fundadas de la física deben basarse en sólo un número finito de observaciones. Siempre es posible hallar el día de mañana un contraejemplo. En ningún momento es posible llegar a una verificación *completa* de una ley. En realidad, no debemos hablar para nada de "verificación" —si con esta palabra queremos significar el establecimiento definitivo de la verdad— sino solamente de confirmación.

Es sumamente interesante el hecho de que, si bien no hay forma de verificar "en sentido estricto" una ley, hay una manera simple de refutarla. Sólo es necesario hallar un contraejemplo. El conocimiento de un contraejemplo puede ser, en sí mismo, incierto. Podemos haber cometido un error de observación o haber sido engañados de alguna manera. Pero si suponemos que el contraejemplo es un hecho, entonces se obtiene inmediatamente la negación de la ley. Si una ley dice que todo objeto que es *P* es también *Q* y hallamos un objeto que es *P* pero no *Q*, la ley queda refutada. Un millón de casos positivos son insuficientes para verificar la ley; un solo contraejemplo basta para refutarla. La situación es marcadamente asimétrica. Es fácil refutar una ley, pero es muy difícil hallar una confirmación firme.

¿Cómo confirmamos una ley? Si hemos observado una gran cantidad de casos positivos y ningún caso negativo, decimos que la confirmación es fuerte. Cuán fuerte es y si la fuerza puede ser expresada numéricamente constituyen

aún cuestiones controvertidas de la filosofía de la ciencia. Volveremos en seguida a estas cuestiones. Aquí sólo nos interesa aclarar que nuestra primera tarea al buscar la confirmación de una ley es someter a prueba casos particulares para determinar si son positivos o negativos. Lo hacemos utilizando nuestro esquema lógico para efectuar predicciones. Una ley declara que $(x)(Px \supset Qx)$; por ende, para un objeto dado a, $Pa \supset Qa$. Tratamos de hallar tantos objetos como podamos (aquí simbolizados por "a") que tengan la propiedad P. Luego, observamos si satisfacen también la condición Q. Si hallamos un caso negativo la cuestión está dirimida. De lo contrario, cada caso positivo es un elemento de juicio adicional que agrega fuerza a nuestra confirmación.

Hay, por supuesto, diversas reglas metodológicas para realizar ensayos eficaces. Por ejemplo, los casos deben ser diversificados todo lo posible. Si se somete a prueba la ley de la dilatación térmica, no debemos limitar nuestras pruebas a sustancias sólidas. Si sometemos a prueba la ley de que todos los metales son buenos conductores de la electricidad, no debemos restringir nuestros ensayos a trozos de cobre. Debemos ensayar tantos metales como sea posible, en condiciones diversas, calientes, frías, etc. No nos detendremos en las numerosas reglas metodológicas relativas a los ensayos; sólo señalaremos que, en todos los casos, se pone a prueba la ley haciendo predicciones y viendo luego si esas predicciones se cumplen. En algunos casos, hallamos en la naturaleza los objetos que deseamos someter a prueba. En otros casos, debemos elaborarlos. Al ensayar la ley de la dilatación térmica, por ejemplo, no buscamos objetos calientes; tomamos ciertos objetos y los calentamos. Crear las condiciones de los ensayos tiene la gran ventaja de que podemos cumplir más fácilmente la regla metodológica de la diversificación; pero, ya elaboremos las situaciones que deben ser ensayadas, ya las hallemos en la naturaleza, el esquema subyacente es el mismo.

Hace un momento planteé la cuestión de si es posible expresar en forma cuantitativa el grado de confirmación de una ley (o de un enunciado singular que predecimos mediante la ley). Si así fuera, en lugar de decir que una ley está "bien fundada" y que otra ley "se basa en elementos de juicio endebles", podríamos decir que la primera ley tiene, por ejemplo, un grado de confirmación de 0,8, mientras que el grado de confirmación de la segunda ley es de sólo 0,2. Esta cuestión ha sido muy debatida. Mi propia opinión es que tal procedimiento es legítimo y que lo que he llamado "grado de confirmación" es idéntico a la probabilidad lógica.

La afirmación anterior no dice mucho hasta que no sepamos qué se entiende por "probabilidad lógica". ¿Por qué agrego el adjetivo "lógica"? Esto no es habitual; la mayoría de los libros sobre la probabilidad no establecen una distinción entre diversos tipos de probabilidad, una de las cuales sea llamada la "probabilidad lógica". Pero es mi creencia que hay dos tipos fundamentalmente diferentes de probabilidad, y los distingo llamando a uno "probabilidad estadística" y al otro "probabilidad lógica". Es lamentable que se haya usado la misma palabra, "probabilidad", en dos sentidos tan diferentes. Por no realizar esta distinción surgen enormes confusiones en libros sobre filosofía de la ciencia y en declaraciones de los mismos científicos. En lugar de "probabilidad lógica" a veces uso la expresión "probabilidad inductiva" porque, en mi concepción, este es el tipo de probabilidad al que se alude cuando hacemos una inferencia inductiva. Por "inferencia inductiva" entiendo, no sólo la inferencia de hechos a leyes, sino también toda inferencia que sea "no demostrativa", esto es, una inferencia tal que la conclusión no se desprende con necesidad lógica cuando se admite la verdad de las premisas. Tales inferencias deben ser expresadas en grados de lo que yo llamo "probabilidad lógica" o "probabilidad inductiva". Para comprender claramente la diferencia entre este tipo de probabilidad

y la probabilidad estadística será útil echar una ojeada a la historia de la teoría de la probabilidad.

La primera teoría de la probabilidad, actualmente llamada por lo común la "teoría clásica", fue elaborada durante el siglo XVIII. Jacobo Bernoulli (1654-1705) fue el primero que escribió un tratado sistemático sobre ella; y también el Reverendo Thomas Bayes hizo una importante contribución a la misma. A fines de este siglo, el gran matemático y físico Pierre Simon de Laplace escribió el primer gran tratado sobre el tema. Contenía una vasta elaboración matemática de una teoría de la probabilidad y puede ser considerada como la obra cumbre del período clásico.

Durante todo este período, la probabilidad se aplicaba principalmente a juegos de azar como los juegos de dados, de naipes y la ruleta. En realidad, la teoría se originó en el pedido que algunos jugadores de la época presentaron a Pierre Fermat y otros matemáticos de que calcularan para ellos las probabilidades exactas implicadas en ciertos juegos de azar. Es decir, la teoría se inició con problemas concretos, no con una teoría matemática general. Los matemáticos hallaron extraño que pudiera responderse a cuestiones de este tipo aunque no hubiese ningún campo de la matemática que suministrara tales respuestas. Como consecuencia de esto, elaboraron la teoría de la combinatoria, que pudo aplicarse a problemas de azar.

¿Qué entendían por "probabilidad" esos hombres que elaboraron la teoría clásica? Propusieron una definición que todavía se encuentra en los libros elementales sobre la probabilidad: esta es la razón del número de casos favorables al número de todos los casos posibles. Veamos cómo opera esta definición en un ejemplo simple. Alguien dice: "Arrojaré este dado. ¿Cuál es la probabilidad de que salga un as o un dos?" La respuesta, según la teoría clásica, es la siguiente. Hay dos "casos favorables", es decir, casos que satisfacen las condiciones especificadas en la pregunta. En total, el dado puede caer de seis maneras posibles. La razón

de los casos favorables a los posibles es, pues, 2:6 o 1:3. Respondemos a la pregunta diciendo que hay una probabilidad 1/3 de que salga un 2 o un as.

Todo esto parece muy claro, hasta obvio, pero hay un obstáculo importante para esta teoría. Los autores clásicos afirmaban que, antes de poder aplicar su definición de probabilidad, es menester asegurarse que todos los casos en cuestión son igualmente probables. Pero entonces, al parecer, estamos atrapados en un círculo vicioso. Tratamos de definir qué entendemos por probabilidad y, al hacerlo, usamos el concepto de "igualmente probable". En realidad, los defensores de la teoría clásica no utilizaban exactamente estos términos. Decían que los casos deben ser "equiposibles". Esta expresión, a su vez, era definida mediante un famoso principio al que llamaban "el principio de razón insuficiente". En la actualidad, se lo llama comúnmente "el principio de indiferencia". Si no se conoce ninguna razón por la cual un caso deba producirse con preferencia a otro, entonces los casos son equiposibles.

Tal era, en resumen, la manera como se definía la probabilidad en el período clásico. Se ha edificado una vasta teoría matemática sobre el enfoque clásico, pero lo único que nos concierne aquí es si el fundamento de esta teoría (la definición clásica de probabilidad) es adecuado para la ciencia.

Poco a poco, durante el siglo XIX, se elevaron algunas voces críticas contra la definición clásica. En el siglo XX, alrededor de 1920, Richard von Mises y Hans Reichenbach sometieron a enérgica crítica al enfoque clásico.[1] Mises decía que la "equiposibilidad" sólo puede ser entendida en el sentido de "equiprobabilidad". Pero si esto es lo que significa, estamos atrapados en un círculo vicioso. La tradición clásica, afirmaba Mises, es circular y, por ende, inútil.

[1] Sobre las ideas de Mises y Reichenbach, ver Richard von Mises, *Probability, Statistics and Truth* (Nueva York: Macmillan, 1939), y Hans Reichenbach, *The Theory of Probability* (Berkeley, California: University of California Press, 1949).

Mises presentó otra objeción aun. Admitía que, en ciertos casos simples, podemos confiar en el sentido común para establecer que ciertos sucesos son equiposibles. Podemos decir que las caras y las cruces son resultados equiposibles cuando se arroja una moneda, porque no conocemos ninguna razón por la cual deba salir un lado y no el otro. Lo mismo sucede con la ruleta; no hay ninguna razón para que la bolilla caiga en un compartimiento y no en otro. Si los naipes son del mismo tamaño y forma, de dorso idéntico y están bien mezclados, entonces es tan probable que un jugador reciba una carta como cualquier otra. Nuevamente, se cumplen las condiciones de la equiposibilidad. Pero ninguno de los autores clásicos, continuaba Mises, indicó cómo puede aplicarse esta definición de probabilidad a muchas otras situaciones. Consideremos las tablas de mortalidad. Las compañías de seguros necesitan conocer la probabilidad de que un hombre de 40 años, en los Estados Unidos y sin ninguna enfermedad seria, viva hasta la misma fecha del año siguiente. Deben estar en condiciones de calcular probabilidades de este tipo porque constituyen la base sobre la cual la compañía establece sus tasas.

¿Cuáles son los casos equiposibles para un hombre?, preguntaba Mises. El señor Pérez solicita un seguro de vida. La compañía lo envía a un médico. El doctor informa que Pérez no tiene ninguna enfermedad seria y que su certificado de nacimiento indica que tiene 40 años de edad. La compañía consulta sus tablas de mortalidad; luego sobre la base de la esperanza de vida probable del hombre, le ofrece un seguro a una cierta tasa. El señor Pérez puede morir antes de llegar a los 41 años o puede vivir hasta los 100. La probabilidad de vivir un año más disminuye progresivamente a medida que aumenta en edad. Supongamos que muere a los 45. Esto es perjudicial para la compañía de seguros porque Pérez sólo pagó unas pocas cuotas y ahora la compañía debe pagar u$s 20.000 a su beneficiario. ¿Cuáles son los casos equiposibles? El señor Pérez puede

morir a los 40, los 41, los 42, etc. Estos son los casos posibles. Pero no son equiposibles; que Pérez viva hasta la edad de 120 años es sumamente improbable. Una situación semejante se encuentra, señala Mises, en la aplicación de la probabilidad a las ciencias sociales, a la predicción del tiempo atmosférico y hasta a la física. Estas situaciones no son como los juegos de azar, en los cuales los resultados posibles pueden ser clasificados claramente en *n* casos mutuamente excluyentes y completamente exhaustivos que satisfagan las condiciones de equiposibilidad. Un pequeño trozo de una sustancia radiactiva emitirá o no una partícula alfa en el próximo segundo. La probabilidad de que emita la partícula es, por ejemplo, de 0,0374. ¿Dónde están los casos equiposibles? No los hay. Sólo tenemos dos casos: o emite la partícula alfa en el próximo segundo o no la emite. Tal era la principal crítica de Mises a la teoría clásica.

En el aspecto constructivo, Mises y Reichenbach sostenían lo siguiente. Lo que entendemos por probabilidad no tiene nada que ver con la enumeración de casos. Es una medida de la "frecuencia relativa". Entendemos por "frecuencia absoluta" el número total de objetos o sucesos; por ejemplo, el número de personas de Los Ángeles que murieron el año anterior de tuberculosis. Por "frecuencia relativa" entendemos la razón de este número al de una clase mayor que se investiga, por ejemplo, el número total de habitantes de Los Ángeles.

Podemos hablar de la probabilidad de que salga una determinada cara de un dado, decía Mises, no sólo en el caso de un dado equilibrado, en el que es de 1/6, sino también en los casos de todo tipo de dados cargados. Supongamos que alguien afirma que su dado está cargado y que la probabilidad de que salga un as no es de 1/6, sino menor. Otra persona dice: "Estoy de acuerdo con usted en que el dado está cargado, pero no de la manera que usted cree. Creo que la probabilidad de un as es mayor que 1/6." Mises señalaba que, para saber qué entienden los dos hombres

por sus aserciones divergentes, debemos observar de qué manera tratan de dirimir su discusión. Por supuesto, harán una prueba empírica. Arrojarán el dado cierto número de veces y llevarán un registro del número de tiros y del número de ases.

¿Cuántas veces arrojarán el dado? Supongamos que lo arrojan cien veces y hallan que sale el as quince veces. Esto es un poco menos que el 1/6 de cien. ¿No demuestra esto que el primer hombre tiene razón? El otro podría responder que no. "Aún creo que la probabilidad es mayor que 1/6. Cien tiros no es suficiente para efectuar una prueba adecuada." Quizás los hombres continúen arrojando el dado hasta completar 6.000 tiros. Si el as sale un poco menos de 1.000 veces, el segundo hombre quizás se decida a ceder. "Usted tiene razón, es menor que 1/6", podría decir.

¿Por qué se detienen los hombres en los 6.000 tiros? Puede ser que estén cansados de arrojar el dado. Quizás hicieron una apuesta de un dólar acerca de la manera de estar cargado el dado, y por un solo dólar no quieren perder tres días más arrojando el dado. Pero la decisión de detenerse en los 6.000 tiros es puramente arbitraria. Si después de 6.000 tiros, el número de ases es muy cercano a 1.000, aún podrían considerar que la cuestión no está resuelta. Una desviación pequeña podría deberse al azar, y no a un defecto físico del dado mismo. A la larga, el defecto podría provocar una desviación en el sentido opuesto. Para realizar una prueba más decisiva, los hombres podrían decidir llegar hasta los 60.000 tiros. Evidentemente, no hay ningún número finito de tiros, por grande que sea, en el cual abandonar la prueba y poder decir con categórica seguridad que la probabilidad de un as es 1/6, menor que 1/6 o mayor.

Puesto que ningún número finito de pruebas basta para determinar una probabilidad con certeza, ¿cómo puede definirse esta probabilidad en términos de frecuencia? Mises y Reichenbach proponían que se la definiera, no como una frecuencia relativa en una serie finita de casos, sino como

el *límite* de la frecuencia relativa en una serie infinita. (Fue esta definición la que distinguió a las ideas de Mises y Reichenbach de las de R. A. Fisher, en Inglaterra, y de las de otros estadísticos que también habían criticado la teoría clásica. Ellos introdujeron el concepto frecuencial de la probabilidad, no por definición, sino como término primitivo de un sistema axiomático.) Por supuesto, Mises y Reichenbach sabían muy bien —aunque a menudo se los ha criticado como si no lo supieran— que ningún observador puede realizar nunca la serie infinita completa de observaciones. Pero creo que sus críticos se equivocaban al afirmar que la nueva definición de probabilidad es inaplicable. Reichenbach y Mises han demostrado que es posible obtener muchos teoremas sobre la base de su definición y, con ayuda de estos teoremas, podemos decir cosas de importancia. No podemos decir con certidumbre cuál es el valor de una probabilidad, pero si la serie es suficientemente larga, podemos decir cuál es *probablemente* la probabilidad. En el ejemplo del dado, podríamos decir que la probabilidad de que la probabilidad de sacar un as sea mayor que 1/6 es muy pequeña. Quizás el valor de esta probabilidad de una probabilidad pueda ser calculado. El hecho de que se use en la definición el concepto de límite y de que se haga referencia a una serie infinita plantea, ciertamente, complicaciones y dificultades, tanto lógicas como prácticas. Pero no hacen de la definición algo carente de sentido, como han afirmado algunos críticos.

Reichenbach y Mises coincidían en la opinión de que este concepto de probabilidad, basado en el límite de una frecuencia relativa en una serie infinita, es el único concepto de probabilidad aceptable en la ciencia. La definición clásica, derivada del principio de indiferencia, era inadecuada. Aparte de la de Mises y Reichenbach, no se había encontrado ninguna nueva definición que fuera superior a la antigua. Pero entonces se planteó una vez más la inquietante cuestión de los casos aislados. La nueva definición era adecuada para los fenómenos estadísticos, pero ¿cómo

se la podía aplicar a un solo caso? Un meteorólogo anuncia que la probabilidad de lluvia para mañana es de 2/3. "Mañana" alude a un día particular y no a otro. Al igual que la muerte del solicitante de un seguro de vida, es un suceso único, que no se repite; sin embargo, queremos asignarle una probabilidad. ¿Cómo se puede lograr esto sobre la base de una definición frecuencial?

Mises pensaba que esto era imposible, por lo cual, era necesario excluir los enunciados de probabilidad para casos aislados. Pero Reichenbach sabía que, tanto en la ciencia como en la vida cotidiana, hacemos constantemente enunciados probabilísticos acerca de sucesos aislados. Sería útil, pensaba, hallar una interpretación plausible de tales enunciados. En la predicción del tiempo, es fácil dar tal interpretación. El meteorólogo dispone de un gran número de informes sobre observaciones pasadas del tiempo, así como datos concernientes al tiempo de hoy. El tiempo de hoy pertenece a una cierta clase y, en el pasado, cuando había un tiempo de esta clase la frecuencia relativa con la cual llovía al día siguiente era de 2/3. Entonces, según Reichenbach, el meteorólogo hace una "postulación"; esto es, supone que la frecuencia observada de 2/3, basada en una serie finita pero bastante larga de observaciones, es también el límite de la serie infinita. En otras palabras, estima que el límite está en la vecindad de 2/3. Luego formula el enunciado: "La probabilidad de lluvia para mañana es de 2/3."

El enunciado del meteorólogo, sostenía Reichenbach, debe ser considerado como un enunciado elíptico. Si hiciera explícito su significado completo diría: "De acuerdo con nuestras observaciones pasadas, los estados del tiempo como el que hemos observado hoy son seguidos por un día de lluvia con una frecuencia de 2/3." El enunciado abreviado parece aplicar la probabilidad a un solo caso, pero esto no es más que una manera de hablar. El enunciado se refiere, realmente, a la frecuencia relativa en una larga serie. Lo mismo puede decirse del enunciado: "La probabilidad de

que salga un as en el próximo tiro del dado es de 1/6." El "próximo tiro" es, como "el tiempo de mañana", un suceso aislado, único. Cuando le atribuimos una probabilidad, en realidad estamos hablando elípticamente acerca de una frecuencia relativa en una larga serie de tiros.

De este modo, Reichenbach halló una interpretación para los enunciados que atribuyen una probabilidad a sucesos aislados. Hasta trató de encontrar una interpretación para los enunciados que atribuyen probabilidades a las hipótesis generales, en la ciencia. No nos detendremos en esta cuestión porque es más complicada y porque (en contraste con su interpretación de las predicciones probabilísticas singulares) no ha hallado aceptación general.

El siguiente avance importante en la historia de la teoría de la probabilidad fue la concepción *lógica*. Fue propuesta después de 1920 por John Maynard Keynes, el famoso economista británico, y desde entonces ha sido desarrollada por muchos autores. En la actualidad, hay una animada controversia entre los defensores de esta concepción lógica y los que están en favor de la interpretación frecuencial. En el capítulo siguiente examinaremos esta controversia y la manera cómo creo yo que debe resolverse.

III

INDUCCIÓN Y PROBABILIDAD LÓGICA

Para John Maynard Keynes, la probabilidad era una relación lógica entre dos proposiciones. Él no intentó definir esta relación. Hasta llegó a decir que no se podía formular ninguna definición de ella. Sólo mediante la intuición, insistía, podemos comprender qué significa la probabilidad. Su libro, *A Treatise on Probability*[1], daba unos pocos axiomas y definiciones, expresados en la lógica simbólica, pero no son muy correctos desde el punto de vista moderno. Algunos de los axiomas de Keynes eran en realidad definiciones. Pero su libro es interesante desde el punto de vista filosófico, especialmente los capítulos en los cuales analiza la historia de la teoría de la probabilidad y las enseñanzas que pueden extraerse hoy de los anteriores puntos de vista. Su afirmación fundamental era que, cuando afirmamos un enunciado probabilístico, no hacemos una afirmación acerca del mundo, sino acerca de una relación lógica entre otros dos enunciados. Solamente estamos diciendo que un enunciado tiene una probabilidad lógica de tanto y tanto con respecto a otro enunciado.

He utilizado la expresión "tanto y tanto". En realidad, Keynes era más cauto. Dudaba, en general, que pudiera convertirse a la probabilidad en un concepto cuantitativo, esto es, un concepto con valores numéricos. Estaba de acuerdo, por supuesto, que esto se podía hacer en casos especiales, como el del dado, en los cuales se puede aplicar el viejo principio de indiferencia. El dado es simétrico, todas

[1] John Maynard Keynes, *Treatise on Probability* (Londres: Macmillan, 1921).

sus caras son iguales, no tenemos ninguna razón para sospechar que esté cargado, etc. Lo mismo es cierto de otros juegos de azar en los cuales se establecen cuidadosamente las condiciones para crear una simetría física o, al menos, una simetría con respecto a nuestro conocimiento e ignorancia. Las ruedas de ruleta están hechas de tal modo que sus distintos sectores son iguales. Se equilibra cuidadosamente la rueda para eliminar todo defecto por el cual la bolilla pudiera detenerse en un número con preferencia a otro. Si alguien lanza una moneda, no tenemos ninguna razón para suponer que saldrán más caras que cruces.

En situaciones restringidas de este tipo, decía Keynes, podemos aplicar legítimamente algo semejante a la definición clásica de probabilidad. Estaba de acuerdo con otros críticos del principio de indiferencia tal como se lo había usado, en el período clásico, en un sentido demasiado amplio y que había sido aplicado erróneamente a muchas situaciones, por ejemplo, a la predicción de que mañana se levantará el sol. Es cierto, sostenía Keynes, que en los juegos de azar y en otras situaciones simples, el principio de indiferencia es aplicable y es posible asignar valores numéricos a la probabilidad. Pero en la mayoría de las situaciones no hay ninguna manera de definir casos equiposibles y, por ende, no hay justificación para aplicar dicho principio. En estos casos, decía Keynes, no debemos utilizar valores numéricos. Su actitud era cautelosa y escéptica. No quería ir demasiado lejos ni pisar lo que él consideraba una delgada capa de hielo, por lo cual restringió la parte cuantitativa de su teoría. En muchas situaciones en las cuales no vacilamos en hacer apuestas y en atribuir valores numéricos a predicciones probabilísticas, Keynes prevenía contra esta costumbre.

La segunda figura importante en la creación del enfoque lógico moderno de la probabilidad es Harold Jeffreys, un geofísico inglés. Su *Teoría de la Probabilidad*, publicado por primera vez en 1939 por Oxford Press, defiende una

concepción muy cercana a la de Keynes. Cuando Keynes publicó su libro (apareció en 1921, de modo que probablemente lo escribió en 1920), acababan de aparecer las primeras publicaciones sobre probabilidad de Mises y Reichenbach. Keynes, al parecer, no las conocía. Criticó el enfoque frecuencial, pero no lo discutió en detalle. En la época en la que Jeffreys escribió su libro, la interpretación frecuencial ya había sido plenamente elaborada, de modo que en esta obra se la trata mucho más explícitamente.

Jeffreys decía llanamente que la teoría frecuencial es totalmente equivocada. Defendió la tesis de Keynes según la cual la probabilidad no se refiere a la frecuencia, sino a una relación lógica. Pero era mucho más osado que el cauteloso Keynes. Creía que era posible asignar valores numéricos a la probabilidad en un gran número de situaciones, especialmente en todas aquellas situaciones en las cuales es aplicable la estadística matemática. Quiso abordar los mismos problemas que interesaron a R. A. Fisher y a otros estadísticos, pero quiso abordarlos sobre la base de un concepto diferente de la probabilidad. Creo que algunos de sus resultados están sujetos a las mismas objeciones que se plantearon contra la teoría clásica, debido a que Jeffreys usó un principio de indiferencia. Pero es difícil encontrar en su libro enunciados específicos que criticar. Sus axiomas, tomados separadamente, son aceptables. Sólo cuando trata de derivar teoremas de un determinado axioma se extravía, en mi opinión.

El axioma en cuestión es enunciado por Jeffreys del siguiente modo: "Asignamos el número mayor, sobre la base de los datos disponibles, a la proposición más probable (y, por lo tanto, números iguales a proposiciones igualmente probables)." La parte incluida en el paréntesis sólo dice, obviamente, que si p y q son igualmente probables sobre la base de los elementos de juicio r, entonces debe asignarse números iguales a p y q como valores de probabilidad con respecto a los elementos de juicio r. El enunciado no nos

dice nada acerca de las condiciones en las cuales debemos considerar a *p* y *q* como igualmente probables con respecto a *r*. En ninguna parte de su libro Jeffreys enuncia estas condiciones. Más adelante, sin embargo, interpreta este axioma de una manera sorprendente para demostrar teoremas acerca de leyes científicas. Escribe: "Si no hay ninguna razón para creer en una hipótesis más que en otra, las probabilidades son iguales." En otras palabras, si los elementos de juicio disponibles son insuficientes para decidir si una teoría dada es verdadera o falsa, debemos concluir que la teoría tiene una probabilidad de 1/2.

¿Es legítimo este uso del principio de indiferencia? En mi opinión, es un uso que fue justamente condenado por los críticos de la teoría clásica. Para que se pueda utilizar el principio de indiferencia, debe haber alguna especie de simetría en la situación, como la igualdad de las caras de un dado o los sectores de una rueda de ruleta, que nos permita afirmar que ciertos casos son igualmente probables. En ausencia de tal simetría en las características lógicas o físicas de una situación, es injustificado suponer probabilidades iguales simplemente porque no sabemos nada acerca de los méritos relativos de hipótesis rivales.

Una ilustración simple ayudará a aclarar este punto. Según la interpretación que da Jeffreys a su axioma, podríamos asignar una probabilidad de 1/2 al enunciado de que hay organismos vivos en Marte porque no tenemos razones suficientes para creer en esta hipótesis ni razones suficientes para creer en su negación. Del mismo modo podríamos argüir que la probabilidad de que haya animales en Marte es de 1/2 y la de que haya seres humanos también de 1/2. Cada aserción, considerada en sí misma, es una aserción acerca de la cual no poseemos suficientes elementos de juicio a favor o en contra. Pero estas aserciones se relacionan entre sí de tal modo que no pueden tener los mismos valores probabilísticos. La segunda aserción es más fuerte que la primera porque la implica, mientras que la primera

no implica a la segunda. Por lo tanto, la segunda aserción tiene menos probabilidad que la primera; la misma relación es válida entre la tercera y la segunda. Debemos ser extremadamente cuidadosos, pues, al aplicar hasta un principio modificado de indiferencia, para no incurrir en tales inconsistencias.

El libro de Jeffreys ha sido duramente criticado por los estadísticos matemáticos. Coincido con su crítica sólo en lo que respecta a los pocos lugares en los cuales Jeffreys desarrolla teoremas que no es posible derivar de sus axiomas. Pero por otra parte, yo diría que tanto Keynes como Jeffreys fueron precursores que trabajaban en la dirección correcta.[2] Mi propia obra sobre la probabilidad sigue la misma dirección. Comparto su opinión de que la probabilidad lógica es una relación lógica. Si se hace un enunciado en el cual se afirme que, para una hipótesis dada, la probabilidad lógica con respecto a los elementos de juicio disponibles es de 0,7, entonces el enunciado total es analítico. Esto significa que dicho enunciado se deduce de la definición de probabilidad lógica (o de los axiomas de un sistema lógico) sin referencia a nada fuera del sistema lógico, esto es, sin referencia a la estructura del mundo real.

En mi concepción, la probabilidad lógica es una relación lógica un poco similar a la implicación lógica. Si los elementos de juicio son tan fuertes que la hipótesis se desprende lógicamente de ellos, si es implicada lógicamente por ellos, estamos ante un caso extremo en el cual la probabilidad es 1. (La probabilidad 1 también aparece en otros casos, pero este es un caso especial en el que aparece.) Análogamente, si la negación de una hipótesis es implicada

[2] Se encontrará una evaluación técnica de la obra de Keynes y Jeffreys y de otros que han defendido la probabilidad lógica en la sección 62 de mi *Logical Foundations of Probability* (Chicago: University of Chicago Press, 1950). Seis secciones no técnicas de este libro fueron reimpresas en forma de una pequeña monografía titulada *The Nature and Application of Inductive Logic* (Chicago: University of Chicago Press, 1951).

lógicamente por los elementos de juicio, la probabilidad lógica de la hipótesis es 0. Entre estos dos casos extremos, hay un continuo de casos acerca de los cuales la lógica deductiva no nos dice nada, aparte de la aserción negativa de que ni la hipótesis ni su negación pueden ser deducidas de los elementos de juicio. Este continuo debe ser abordado mediante la lógica inductiva. Pero la lógica inductiva se asemeja a la deductiva en que se ocupa solamente de los enunciados en cuestión, no de los hechos de la naturaleza. Mediante un análisis lógico de una hipótesis *h* y elementos de juicio *e*, llegamos a la conclusión de que *h* no es lógicamente implicada por *e* sino, por así decir, es parcialmente implicada por *e* en el grado tanto y tanto.

Al llegar a este punto, se justifica, en mi opinión, la asignación de un valor numérico a la probabilidad. Si es posible, quisiéramos construir un sistema de lógica inductiva de tal tipo que, para todo par de oraciones, una de las cuales afirme los elementos de juicio *e* y la otra enuncie una hipótesis *h*, podamos asignar un número que exprese la probabilidad lógica de *h* con respecto a *e*. (No tomamos en consideración el caso trivial en el cual la oración *e* es contradictoria; en tales casos, no puede asignarse a *h* ningún valor probabilístico.) He logrado elaborar definiciones posibles de tales probabilidades para lenguajes muy simples que sólo contienen predicados monádicos, y actualmente se está tratando de extender la teoría a lenguajes más amplios. Por supuesto, para que toda esta lógica inductiva que estoy tratando de construir sobre esta base sea de valor real para la ciencia, debe ser aplicable finalmente a un lenguaje cuantitativo como el de la física, en el cual no sólo hay predicados monádicos o diádicos, sino también magnitudes numéricas: masa, temperatura, etc. Creo que esto es posible y que los principios básicos necesarios son los mismos que los principios que guiaron la labor en la construcción de una lógica inductiva para el lenguaje simple de predicados monádicos.

Cuando digo que creo posible aplicar una lógica inductiva

al lenguaje de la ciencia, no quiero decir con ello que sea posible formular un conjunto de reglas, establecidas de una vez para siempre, que conduzca automáticamente y en todos los campos de los hechos a teorías. Parece dudoso, por ejemplo, que sea posible formular reglas que permitan a un científico examinar cien mil oraciones contenidas en diversos informes observacionales y luego hallar, por una aplicación mecánica de esas reglas, una teoría general (sistema de leyes) que explique los fenómenos observados. Habitualmente esto no es posible porque las teorías, especialmente las más abstractas, que tratan de entidades no observables como partículas y campos, utilizan una armazón conceptual que va mucho más allá del esquema utilizado para la descripción del material de observación. No se puede seguir simplemente un procedimiento mecánico basado en reglas fijas para idear un nuevo sistema de conceptos teóricos y, con su ayuda, una teoría. Para esto se necesita ingenio creador. A veces se expresa esta observación diciendo que no puede haber una máquina inductiva, una computadora en la cual podamos colocar todas las oraciones observacionales importantes y obtener como resultado un claro sistema de leyes que explique los fenómenos observados.

Estoy de acuerdo en que no puede haber una máquina inductiva, si el propósito de la máquina es inventar nuevas teorías. Creo, sin embargo, que puede haber una máquina inductiva con un objetivo mucho más modesto. Dadas ciertas observaciones *e* y una hipótesis *h* (por ejemplo, en forma de una predicción o hasta de un conjunto de leyes), creo que en muchos casos es posible determinar, por procedimientos mecánicos, la probabilidad lógica o grado de confirmación de *h* sobre la base de *e*. Para designar este concepto de probabilidad también uso la expresión "probabilidad inductiva", porque estoy convencido de que este es el concepto básico que interviene en todo razonamiento inductivo y que la principal tarea del razonamiento inductivo es la evaluación de esta probabilidad.

Si contemplamos la situación actualmente reinante en la teoría de la probabilidad, hallamos una controversia entre los partidarios de la teoría frecuencial y aquellos que, como Keynes, Jeffreys y yo mismo hablamos en términos de una probabilidad lógica. Pero hay una importante diferencia entre mi posición y la de Keynes y Jeffreys. Ellos rechazan el concepto frecuencial de la probabilidad, pero yo no. Creo que el concepto frecuencial, también llamado probabilidad estadística, es un concepto científico adecuado, se lo introduzca mediante una definición explícita, como en los sistemas de Mises y Reichenbach, o mediante un sistema axiomático y reglas de aplicación práctica (sin definición explícita), como en la estadística matemática contemporánea. En ambos casos considero que este concepto es importante para la ciencia. En mi opinión, el concepto lógico de probabilidad es un segundo concepto de naturaleza totalmente diferente del anterior, aunque igualmente importante.

Los enunciados que dan valores de probabilidad estadística no son puramente lógicos; son enunciados fácticos expresados en el lenguaje de la ciencia. Cuando un médico dice que la probabilidad de que un paciente reaccione positivamente a cierta inyección es "muy buena" (o quizás utilice un valor numérico y diga 0,7), está expresando un enunciado de la ciencia médica. Cuando un físico dice que la probabilidad de cierto fenómeno radiactivo es tanto y tanto, está expresando un enunciado de la física. La probabilidad estadística es un concepto científico, empírico. Los enunciados acerca de probabilidades estadísticas son enunciados "sintéticos", enunciados que no pueden ser demostrados mediante la lógica, sino que se basan en investigaciones empíricas. En este punto, estoy totalmente de acuerdo con Mises, Reichenbach y los estadísticos. Cuando decimos, "con este dado particular, la probabilidad estadística de sacar un as es de 0,157", estamos enunciando una hipótesis científica que sólo puede ser sometida a prueba por una serie de observaciones. Es un enunciado empírico

porque sólo una investigación empírica puede confirmarlo.

A medida que la ciencia avanza, los enunciados de probabilidad de este tipo parecen adquirir cada vez mayor importancia, no sólo en las ciencias sociales, sino también en la física moderna. La probabilidad estadística no sólo interviene en dominios en los cuales es necesaria debido a ignorancia (como en las ciencias sociales o cuando un físico calcula la trayectoria de una molécula en un líquido), sino también como factor esencial en los principios básicos de la teoría cuántica. Es de la mayor importancia para la ciencia disponer de una teoría de la probabilidad estadística. Estas teorías han sido desarrolladas por estadísticos y, de una manera diferente, por Mises y Reichenbach.

Pero, por otra parte, también necesitamos del concepto de probabilidad lógica. Es especialmente útil en enunciados metacientíficos, esto es, enunciados acerca de la ciencia. Le decimos a un científico: "Usted afirma que puedo confiar en esta ley para hacer cierta predicción. ¿En qué medida se halla bien establecida esta ley? ¿En qué medida es confiable la predicción?" El científico, en la actualidad, puede o no tener deseos de responder a una cuestión metacientífica de este tipo en términos cuantitativos. Pero creo que, cuando la lógica inductiva esté suficientemente desarrollada, podría responder: "Esta hipótesis se halla confirmada en el grado 0,8, sobre la base de los elementos de juicio disponibles." Un científico que responda de esta manera está expresando un enunciado acerca de una relación lógica entre los elementos de juicio y la hipótesis en cuestión. El tipo de probabilidad que tiene *in mente* es la probabilidad lógica, a la cual también llamo "grado de confirmación". Su afirmación de que el valor de esta probabilidad es de 0,8 no es, en este contexto, un enunciado sintético (empírico), sino analítico. Es analítico porque no requiere ninguna investigación empírica. Expresa una relación lógica entre una oración que enuncia los elementos de juicio y una oración que enuncia la hipótesis.

Obsérvese que al hacer un enunciado de probabilidad analítico siempre es necesario indicar explícitamente los elementos de juicio. El científico no debe decir: "La hipótesis tiene una probabilidad de 0,8." Debe agregar: "con respecto a tales y cuales elementos de juicio". Si no agrega esto, su enunciado puede ser tomado por un enunciado de probabilidad estadística. Si pretende ser un enunciado de probabilidad lógica, constituye un enunciado elíptico en el cual ha quedado afuera un componente importante. En la teoría cuántica, por ejemplo, a menudo es difícil saber si un físico quiere expresar una probabilidad estadística o una probabilidad lógica. Los físicos habitualmente no establecen esta distinción. Hablan como si sólo trabajaran con un único concepto de probabilidad. "Nos referimos a ese tipo de probabilidad que satisface a los axiomas corrientes de la teoría de la probabilidad", quizás digan. Pero ambos conceptos satisfacen a los axiomas corrientes de la teoría de la probabilidad, de modo que esta observación no aclara cuál es exactamente el tipo de probabilidad al que se refieren.

Una ambigüedad similar se encuentra en los enunciados de Laplace y de otros que elaboraron la concepción clásica de la probabilidad. No eran conscientes, como lo somos hoy, de la diferencia entre la probabilidad lógica y la probabilidad frecuencial. Por esta razón, no siempre es posible saber a cuál de estos conceptos se refieren. Yo estoy convencido, sin embargo, que la mayoría de las veces –no siempre, por supuesto– aluden al concepto lógico. Mises y otros defensores de la teoría frecuencial no tenían razón, según creo, en ciertas críticas que hicieron a la escuela clásica. Mises creía que no había otro concepto científico de probabilidad más que el frecuencial, por lo cual suponía que, si los autores clásicos querían significar algo con "probabilidad", deben de haber querido significar probabilidad estadística. Claro que ellos no podían decir clara y explícitamente que lo que querían significar era la frecuencia relativa, pero esto es, según Mises lo que implícitamente

querían decir. No estoy de acuerdo. Creo que, cuando los autores clásicos hacían ciertos enunciados acerca de la probabilidad *a priori*, hablaban de la probabilidad lógica, que es analítica y, por ende, puede ser considerada *a priori*. No considero a estos enunciados como violaciones del principio de empirismo, como Mises y Reichembach.

Permítaseme agregar una palabra de cautela. Después de haber expresado esta opinión en mi libro sobre la probabilidad, varios colegas —algunos de ellos, amigos míos— me señalaron ciertas citas de autores clásicos y me dijeron que lo que aquellos autores tenían *in mente* no puede haber sido la probabilidad lógica. Estoy de acuerdo con ellos. En algunos de sus enunciados, los autores clásicos no pueden haber querido significar la probabilidad lógica; presumiblemente, aludían a la probabilidad frecuencial. Sin embargo, estoy convencido de que su concepto básico era el de probabilidad lógica. Creo que esto hasta se halla implicado por el título del primer libro sistemático que se haya escrito sobre el tema, el *Ars conjectandi* de Jacobo Bernoulli, es decir el Arte de la conjetura. La teoría de la probabilidad de Mises no es un arte de la conjetura. Es una teoría axiomática, formulada matemáticamente, acerca de fenómenos de masas. No hay nada conjetural en ella. Lo que Bernoulli quería significar era muy diferente. Tenemos ciertos sucesos, decía, tales como la manera en que ha caído un dado, y queremos hacer una conjetura acerca de cómo caerá si lo arrojamos otra vez. Queremos aprender a hacer apuestas racionales. La probabilidad, para los autores clásicos, era el grado de certeza o confianza que pueden tener nuestras creencias acerca de sucesos futuros. Esto es probabilidad lógica, no probabilidad en el sentido estadístico.[3]

[3] Mi opinión general de que tanto la probabilidad estadística como la lógica son conceptos científicos legítimos y adecuados que desempeñan papeles diferentes está expresada en el Capítulo II de *Logical Foundations of Probability*, citado en la nota anterior y en mi artículo de 1945 "The Two Concepts of Probability", reimpreso en *Readings in Philosophical Analysis*, recopilación de Herbert Feigl y Wilfrid

No explicaré aquí con mayores detalles mi concepción de la probabilidad, porque supone muchas complejidades técnicas. Pero examinaré la inferencia en la cual los dos conceptos de probabilidad pueden aparecer juntos. Esto sucede cuando la hipótesis o una de las premisas de la inferencia inductiva contiene un concepto de probabilidad estadística. Podemos comprender esto fácilmente modificando el esquema básico utilizado en nuestro examen de las leyes universales. En lugar de una ley universal (1), tomamos como primera premisa una ley estadística (1'), según la cual la frecuencia relativa (*fr*) de *Q* con respecto a *P* es (por ejemplo) 0,8. La segunda premisa (2) declara, como antes, que un cierto individuo *a* tiene la propiedad *P*. El tercer enunciado (3) afirma que *a* tiene la propiedad *Q*. Este tercer enunciado, *Qa*, es la hipótesis que queremos considerar sobre la base de las dos premisas.

En forma simbólica:

(1') $rf(Q,P)=0{,}8$
(2) Pa
(3) Qa

¿Qué podemos decir acerca de la relación lógica de (3) con (1') y (2)? En el caso anterior, el del esquema de una ley universal, podíamos afirmar el siguiente enunciado lógico:

(4) El enunciado (3) está implicado lógicamente por (1) y (2).

No podemos afirmar tal enunciado acerca del nuevo esquema porque esta nueva premisa (1') es más debil que la

Sellars (Nueva York: Appleton Century-Crofts, 1949), pp. 330-348, y *Readings in the Philosophy of Science*, recopilación de Herbert Feigl y May Brodbeck (Nueva York: Appleton Century-Crofts, 1953), pp. 438-455. Se encontrará una defensa del mismo punto de vista escrita en un estilo más popular en mi artículo "What is Probability?", Scientific American, 189 (Setiembre de 1953).

premisa (1); enuncia una frecuencia relativa, no una ley universal. Pero *podemos* expresar el siguiente enunciado, que también afirma una relación lógica, aunque en términos de probabilidad lógica o grado de confirmación, no en términos de implicación:

(4') El enunciado (3), sobre la base de (1') y (2), tiene una probabilidad de 0,8.

Obsérvese que este enunciado, como el enunciado (4), no es una inferencia lógica a partir de (1') y (2). Tanto (4) como (4') son enunciados de lo que se llama un metalenguaje; son enunciados lógicos *acerca de* tres aserciones: (1) [o (1'), respectivamente], (2) y (3).

Es importante comprender de manera precisa qué se entiende por un enunciado como "la probabilidad estadística de *Q* con respecto a *P* es de 0,8". Cuando los científicos formulan tales enunciados y hablan de probabilidad en el sentido frecuencial, no siempre está claro a qué frecuencia se refieren exactamente. ¿Es a la frecuencia de *Q* en una muestra examinada? ¿Es a la frecuencia de *Q* en la población total en consideración? ¿Es a una *estimación* de la frecuencia en la población total? Si el número de casos observados de la muestra es muy grande, entonces la frecuencia de *Q* en la muestra puede no diferir en grado significativo de la frecuencia de *Q* en la población o de una estimación de esta frecuencia. Sin embargo, es importante tener presente las distinciones teóricas aquí implicadas.

Supongamos que deseamos saber cuál es el porcentaje, en una población de cien mil hombres que viven en determinada ciudad, de los que se afeitan con máquinas eléctricas. Decidimos interrogar a mil de ellos. Para evitar que la muestra sea parcial, debemos elegir los mil hombres de acuerdo con métodos elaborados por quienes han trabajado en el campo de las técnicas modernas de sondeo de la opinión. Supóngase que obtenemos una muestra representativa y que ochocientos hombres de la misma informan que usan

afeitadora eléctrica. La frecuencia relativa observada de esta propiedad es, por lo tanto, de 0,8. Puesto que mil es una muestra bastante grande, podemos concluir que la probabilidad estadística de esta propiedad en la población total es de 0,8. Hablando en términos estrictos, esta conclusión no está justificada. Sólo se conoce el valor de la frecuencia en la muestra. No se conoce el valor de la frecuencia en la población. Lo más que podemos hacer es *estimar* la frecuencia en la población. Es menester no confundir esta estimación con el valor de la frecuencia en la muestra. En general tales estimaciones se apartan en cierta dirección de la frecuencia relativa observada en una muestra.[4]

Supongamos que se conoce (1'): la probabilidad estadística de *Q*, con respecto a *P*, es de 0,8. (Como sabemos, esto es una cuestión que no necesitamos considerar aquí. Podemos haber interrogado a toda la población de cien mil hombres, entrevistando a cada hombre de la ciudad.) El enunciado de esta probabilidad, por supuesto, es un enunciado empírico. Supongamos también que se conoce la segunda premisa: (2) *Pa*. Podemos ahora expresar el enunciado (4'), el cual dice que la probabilidad lógica de (3) *Qa*, con respecto a las premisas (1') y (2), es de 0,8. Pero si la primera premisa no es un enunciado de probabilidad estadística, sino el enunciado de una frecuencia relativa observada en una muestra, entonces debemos tomar en consideración el tamaño de la muestra. Aún podemos calcular la probabilidad lógica, o grado de confirmación, expresada en el enunciado (4), pero no será exactamente 0,8. Presentará una desviación cuyas formas he examinado en la monografía mencionada en la nota anterior.

Cuando se efectúa una inferencia inductiva, de la ma-

[4] No he examinado esta cuestión en mi *Logical Foundations of Probability*; pero en una pequeña monografía titulada *The Continuum of Inductive Methods* (University of Chicago Press, 1952), he desarrollado una serie de técnicas para estimar la frecuencia relativa sobre la base de muestras observadas.

nera indicada, que pasa de una muestra a la población, de una muestra a una muestra futura desconocida o de una muestra a un caso futuro desconocido la llamo "inferencia probabilística indirecta" o "inferencia inductiva indirecta", para distinguirla de la inferencia inductiva que pasa de la población a una muestra o un caso. Como he dicho antes, *si* se da en (1') un conocimiento de la probabilidad estadística real en la población, es correcto afirmar en (4) el mismo valor numérico para el grado de confirmación. Tal inferencia no es deductiva; ocupa una posición intermedia entre los otros tipos de inferencia, el inductivo y el deductivo. Algunos autores hasta la han llamado una "inferencia probabilística deductiva", pero yo prefiero considerarla como inductiva más que como deductiva. Siempre que se da la probabilidad estadística para una población y queremos determinar la probabilidad para una muestra, los valores que brinda mi lógica inductiva son los mismos que los del estadístico. Pero *si* hacemos una inferencia indirecta, de una muestra a la población o de una muestra a un caso futuro aislado o una muestra finita futura (a estos dos últimos casos los llamo "inferencias predictivas"), entonces, creo que los métodos utilizados en estadística no son totalmente adecuados. En mi monografía *The Continuum of Inductive Methods*, doy las razones de mi escepticismo.

Los puntos principales que deseo destacar aquí son los siguientes: ambos tipos de probabilidad —la estadística y la lógica— pueden aparecer en la misma cadena de razonamientos. La probabilidad estadística forma parte del lenguaje de objeto de la ciencia. A los enunciados acerca de la probabilidad estadística les podemos aplicar la probabilidad lógica, que forma parte del metalenguaje de la ciencia. Es mi convicción la de que este punto de vista brinda un cuadro mucho más claro de la inferencia estadística que el que se encuentra comúnmente en los libros sobre estadística, y que ofrece un cimiento esencial para la construcción de una adecuada lógica inductiva de la ciencia.

IV

EL MÉTODO EXPERIMENTAL

Una de las grandes características distintivas de la ciencia moderna, en comparación con la ciencia de períodos anteriores, es su énfasis en lo que se llama el "método experimental". Como hemos visto, todo conocimiento empírico se basa finalmente en observaciones, pero estas observaciones pueden ser realizadas de dos maneras esencialmente diferentes. En la manera no experimental, desempeñamos un papel pasivo. Simplemente contemplamos las estrellas o algunas flores, observamos semejanzas y diferencias, y tratamos de descubrir regularidades que puedan ser expresadas en forma de leyes. En la manera experimental, asumimos un papel activo. En lugar de ser espectadores, *hacemos* algo que producirá mejores resultados observacionales que los que obteníamos contemplando simplemente la naturaleza. En lugar de esperar a que la naturaleza nos ofrezca situaciones para observarlas, tratamos de crear tales situaciones. En resumen, hacemos experimentos.

El método experimental ha sido enormemente fecundo. El gran progreso que ha hecho la física en los últimos doscientos años, especialmente en las últimas décadas, habría sido imposible sin el método experimental. Si esto es así, se podría preguntar por qué no se usa el método experimental en todos los campos de la ciencia. En algunos campos no es tan fácil utilizarlo como en la física. En astronomía, por ejemplo, no podemos darle un empujón a un planeta en determinada dirección diferente de la real para ver qué le sucede. Los objetos astronómicos están fuera de alcance; sólo podemos observarlos y describirlos. A veces,

los astrónomos pueden crear en el laboratorio condiciones semejantes a las que imperan, por ejemplo, en la superficie del Sol o de la Luna para luego observar qué sucede en el laboratorio en esas condiciones. Pero este no es realmente un experimento astronómico. Es un experimento físico atinente al conocimiento astronómico.

Razones totalmente diferentes impiden que los científicos sociales realicen experimentos con grandes grupos de personas. Los científicos sociales realizan experimentos con grupos, pero habitualmente son grupos pequeños. Si queremos saber cómo reaccionan las personas cuando no pueden obtener agua, podemos tomar dos o tres personas, darles una dieta sin líquido y observar sus reacciones. Pero esto no nos dice mucho acerca de cómo reaccionaría una gran comunidad si se le cortara el suministro de agua. Sería un experimento interesante cortar el suministro de agua de Nueva York, por ejemplo. ¿La gente se pondría frenética o apática? ¿Tratarían de organizar una revolución contra el gobierno de la ciudad? Por supuesto, ningún científico social sugeriría la realización de tal experimento porque sabe que la comunidad no lo permitiría. La gente no admitiría que los científicos sociales jugaran con sus necesidades esenciales.

Aun cuando no impliquen ninguna crueldad real hacia una comunidad, a menudo hay fuertes presiones sociales contra los experimentos con grupos. Por ejemplo, hay una tribu en Méjico que ejecuta una cierta danza ritual cuando se produce un eclipse de sol. Los miembros de la tribu están convencidos que sólo de esta manera pueden aplacar al dios que causa el eclipse. Finalmente, la luz del sol retorna. Supóngase que un grupo de antropólogos trata de convencer a esas personas que su danza ritual no tiene nada que ver con el retorno del sol. Los antropólogos proponen a la tribu que haga el experimento de no ejecutar la danza la próxima vez que se oculte la luz del sol y vea lo que sucede. Los hombres de la tribu responderían con indigna-

ción. Para ellos, esto significaría correr el riesgo de vivir el resto de sus días en la oscuridad. Creen tan firmemente en su teoría que no quieren someterla a prueba. Como se ve, pues, hay obstáculos para realizar experimentos en las ciencias sociales aun cuando los científicos estén convencidos de que la realización de los experimentos no traerá aparejado ningún perjuicio social. En general, el científico social se limita a lo que puede aprender de la historia y de experimentos con individuos y pequeños grupos. En una dictadura, sin embargo, a menudo se hacen experimentos con grandes grupos, no para poner a prueba una teoría justamente, sino porque el gobierno cree que un nuevo procedimiento puede dar mejores resultados que uno viejo. El gobierno experimenta en gran escala en los dominios de la agricultura, la economía, etc. En una democracia, no es posible hacer tales audaces experimentos porque, si no resultaran, el gobierno tendría que enfrentarse con la ira pública en la siguiente elección.

El método experimental es especialmente fecundo en campos en los cuales hay conceptos cuantitativos que es posible medir exactamente. ¿Cómo planea el científico un experimento? Es difícil describir la naturaleza general de los experimentos, porque los hay de muy diferentes tipos, pero pueden señalarse unas pocas características generales.

Ante todo, tratamos de determinar los factores importantes implicados en el fenómeno que queremos investigar. Algunos factores —pero no demasiados— deben ser dejados de lado por ser de escasa importancia. En un experimento mecánico, por ejemplo, en el que intervengan ruedas, palancas, etc., podemos decidir dejar de lado la fricción. Sabemos que la fricción interviene, pero pensamos que su influencia es demasiado pequeña para que se justifique complicar el experimento tomándola en consideración. Análogamente, en un experimento con cuerpos en movimiento lento, podemos optar por despreciar la resistencia del aire. Si trabajamos con velocidades muy altas, como la de un proyectil que

se mueve a velocidades supersónicas, ya no podemos despreciar la resistencia del aire. En resumen, el científico sólo deja de lado aquellos factores de los que piensa que su influencia sobre su experimento será insignificante. A veces, para evitar que un experimento sea demasiado complicado, hasta puede despreciar factores de los que piensa que pueden tener efectos importantes.

Después de haber tomado una decisión acerca de los factores de importancia, ideamos un experimento en el cual se mantienen constantes algunos de esos factores, mientras que se permite variar a otros. Supongamos que estamos experimentando con un gas contenido en un recipiente y queremos mantener la temperatura del gas lo más constante posible. Sumergimos el recipiente en un baño de agua de volumen mucho mayor. (El calor específico del gas es tan pequeño con relación al calor específico del agua que, aunque la temperatura del gas variara momentáneamente, por compresión o expansión, volvería rápidamente a la temperatura anterior.) O podemos desear mantener una cierta corriente eléctrica a una tasa de flujo constante. Quizás podamos hacerlo mediante un amperímetro, de modo que si observamos un aumento o una disminución de la corriente podemos alterar la resistencia y mantener constante la corriente. De maneras semejantes a éstas, podemos mantener constantes ciertas magnitudes, mientras observamos lo que sucede cuando se hacen variar otras magnitudes.

Nuestro propósito final es hallar leyes que vinculen a *todas* las magnitudes importantes; pero, si intervienen muchos factores, puede tratarse de una tarea complicada. En un comienzo, por esa razón, nos limitamos a leyes de nivel inferior, que vinculen *algunos* de los factores. El primer paso más simple si intervienen k magnitudes, es disponer el experimento de modo que se mantengan constantes k-2 magnitudes. Esto deja en libre variación a dos magnitudes, M_1 y M_2. Alteramos una de ellas y observamos cómo se comporta la otra. Puede suceder que M_2

disminuya cuando M_1 aumenta. O quizás, a medida que M_1 aumenta, M_2 primero sube y luego baja. El valor de M_2 es una función del valor de M_1. Podemos diagramar esta función en forma de una curva, en una hoja de papel para gráficos, y determinar, quizás, la ecuación que expresa la función. Llegaremos, así, a una ley *restringida:* si las magnitudes M_3, M_4, M_5... se mantienen constantes y M_1 aumenta, M_2 varía en la forma que expresa una cierta ecuación. Pero esto sólo es el comienzo. Continuamos nuestro experimento inspeccionando otros conjuntos de *k*-2 factores, para ver cómo están relacionados funcionalmente otros pares de magnitudes. Luego, experimentamos de la misma manera con tríos de factores, manteniendo constantes todas las magnitudes excepto tres. En algunos casos, a partir de las leyes relativas a los pares podemos conjeturar algunas o todas las leyes concernientes a los tríos. Luego, tratamos de establecer leyes aun más generales que abarquen cuatro magnitudes y, finalmente, las leyes más generales, a veces muy complicadas, que abarcan a todos los factores de importancia.

A título de ejemplo simple, consideremos el siguiente experimento con un gas. Hemos observado en líneas generales que la temperatura, el volumen y la presión de un gas a menudo varían simultáneamente. Queremos saber exactamente cómo están relacionadas entre sí estas tres magnitudes. Un cuarto factor de importancia es el gas que usemos. Podemos experimentar con otros gases más adelante, pero al principio decidimos mantener constante este factor utilizando solamente hidrógeno puro. Colocamos el hidrógeno en un recipiente cilíndrico (ver Figura 4-1) con un pistón móvil sobre el cual puede colocarse un peso. Podemos medir fácilmente el volumen del gas y podemos hacer variar la presión cambiando el peso colocado sobre el pistón. La temperatura se regula y se mide por otros medios.

Antes de iniciar los experimentos para determinar cómo están relacionados los tres factores, la temperatura, el volu-

men y la presión, necesitamos realizar algunos experimentos preliminares para asegurarnos de que no hay otros factores de importancia. Algunos factores que podríamos suponer importantes resultan no serlo. Por ejemplo, ¿es importante la forma del recipiente que contiene al gas? Sabemos que en algunos experimentos (por ejemplo, en la distribución de una carga eléctrica y su superficie potencial) la forma del objeto en cuestión es importante. Pero en nuestro caso no es difícil establecer que la forma del recipiente carece de importancia; sólo importa el volumen. Podemos apelar a nuestro conocimiento de la naturaleza para descartar muchos otros factores. Un astrólogo puede entrar en el laboratorio y preguntar: "¿Ha verificado usted dónde se encuentran hoy los planetas? Sus posiciones pueden tener alguna influencia sobre su experimento." Consideramos que este factor carece de importancia porque creemos que los planetas están demasiado lejos para ejercer alguna influencia.

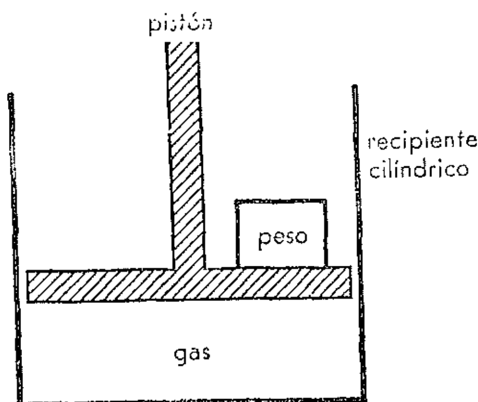


Figura 4-1.

Nuestra suposición acerca del carácter ajeno al experimento de los planetas es correcta, pero sería un error pensar que podemos excluir automáticamente varios factores simplemente porque creemos que no tienen ninguna influen-

cia. No hay manera de estar realmente seguros hasta no hacer ensayos experimentales. Imagine el lector que vive antes de la invención de la radio. Alguien coloca una caja en la mesa y le dice a usted que si alguien canta en un cierto lugar situado a miles de kilómetros de distancia, usted oirá en el aparato de la caja cantar exactamente la misma canción, en el mismo tono y el mismo ritmo. ¿Usted le creería? Probablemente respondería: "¡Imposible! No hay cables eléctricos unidos a esta caja. Yo sé por mi experiencia que nada de lo que suceda a miles de kilómetros puede tener ningún efecto sobre lo que sucede en esta habitación."

El anterior es exactamente el mismo razonamiento por el cual decidimos que las posiciones de los planetas no pueden afectar a nuestros experimentos con hidrógeno. Es obvio que debemos ser muy cautelosos. A veces, hay influencias que no podemos conocer hasta que no se las descubre. Por esta razón, el primer paso de nuestro experimento —la determinación de los factores importantes— es a veces difícil. Además, es un paso al que a menudo no se menciona explícitamente en los informes sobre las investigaciones. El científico sólo describe el aparato que usó, el experimento que realizó y lo que descubrió acerca de las relaciones entre ciertas magnitudes. No agrega: "Y además hallé que tales y tales factores no tienen ninguna influencia sobre los resultados." En la mayoría de los casos, cuando se tiene bastante conocimiento del campo en el cual se realiza la investigación, el científico da por supuesto que otros factores carecen de importancia. Puede tener razón. Pero en nuevos campos, es necesario ser sumamente cautos. Nadie pensaría, por supuesto, que un experimento de laboratorio puede alterarse porque miremos al aparato desde una distancia de treinta centímetros o de tres metros, o porque estemos con buen o mal ánimo cuando lo miramos. Probablemente estos factores carecen de importancia, pero no podemos estar absolutamente seguros. Si alguien sospecha que estos factores son importantes, debe hacerse un experimento para excluirlos.

Consideraciones de orden práctico nos impiden, claro está, poner a prueba todo factor que pueda ser importante. Podrían someterse a prueba miles de posibilidades remotas y no hay tiempo, simplemente, para examinarlas a todas. Debemos proceder de acuerdo con el sentido común y corregir nuestras suposiciones sólo si sucede algo inesperado que nos obligue a considerar importante un factor que antes habíamos despreciado. ¿Influye el color de las hojas de los árboles situados fuera del laboratorio sobre la longitud de onda de la luz utilizada en un experimento? ¿Funcionará un aparato de manera diferente según que su propietario legal esté en Nueva York o en Chicago o según sus impresiones acerca del experimento? Obviamente, no tenemos tiempo para someter a prueba estos factores. Suponemos que la actitud mental del propietario del equipo no tiene influencia física sobre el experimento, pero los miembros de ciertas tribus pueden opinar de otra manera. Pueden creer que los dioses ayudarán al experimento sólo si el propietario del aparato quiere que el experimento se haga y no si lo quiere su usuario. Así, las creencias culturales a veces influyen en lo que se considera importante. En la mayoría de los casos, el científico medita el problema, hace una conjetura de sentido común acerca de los factores que vale la pena considerar y, quizás, realiza unos pocos experimentos preliminares para descartar factores acerca de los cuales tiene dudas.

Supongamos que hemos decidido que los factores importantes para nuestro experimento con el hidrógeno son la temperatura, la presión y el volumen. La naturaleza y la cantidad total del gas contenido en el recipiente permanecen constantes porque lo mantenemos bien cerrado. Estamos en libertad, pues, de ensayar las relaciones entre los tres factores. Si mantenemos constante la temperatura pero aumentamos la presión, descubrimos que el volumen varía en forma inversamente proporcional a la presión. Esto es, si duplicamos la presión, el volumen disminuirá a la mitad. Si triplicamos la presión, el volumen disminuirá a la tercera

parte. Se trata del famoso experimento realizado en el siglo XVII por el físico irlandés Robert Boyle. La ley que descubrió, conocida como ley de Boyle declara que si se mantiene constante la temperatura de un gas contenido en un recipiente, el producto del volumen por la presión también es constante.

Luego mantenemos constante la presión (dejando el mismo peso sobre el pistón) pero hacemos variar la temperatura. Descubrimos entonces que el volumen aumenta cuando se calienta el gas y disminuye cuando se lo enfría; midiendo el volumen y la temperatura, hallamos que el volumen es proporcional a la temperatura. (A esta ley se la llama a veces de Charles, por el científico francés Jacques Charles.) Debemos tomar la precaución de no usar la escala Farenheit o la centígrada, sino una escala en la cual el cero sea "cero absoluto", o −273 grados de la escala centígrada. Se trata de la "escala absoluta", o "escala Kelvin", introducida por Lord Kelvin, físico inglés del siglo XIX. Es ahora fácil pasar a una verificación experimental de una ley general que incluya a los tres factores. Tal ley, en efecto, la sugieren las dos leyes que ya hemos obtenido, pero la ley general tiene mayor contenido empírico que las dos leyes juntas. Esta ley general declara que si la cantidad de un gas encerrado en un recipiente permanece constante, el producto de la presión por el volumen es igual al producto de la temperatura por R ($P.V = T.R$). En esta ecuación R es una constante que varía con la cantidad de gas en consideración. Esta ley general da la relación entre las tres magnitudes y, por lo tanto, es de eficacia considerablemente mayor, para hacer predicciones, que las otras dos leyes combinadas. Si conocemos el valor de dos cualesquiera de las tres magnitudes variables, podemos predecir fácilmente la tercera.

Este ejemplo de un experimento simple nos muestra cómo es posible mantener constantes ciertos factores para estudiar las relaciones de dependencia que rigen entre otros factores. También muestra, y esto es muy importante, la fe-

cundidad de los conceptos cuantitativos. Las leyes establecidas mediante este experimento presuponen la capacidad de medir las diversas magnitudes que intervienen en él. Si no fuera así, sería necesario formular las leyes de manera cualitativa, y tales leyes serían mucho más débiles y mucho menos útiles para hacer predicciones. Sin las escalas numéricas de presión, volumen y temperatura, lo más que podríamos decir acerca de una de las magnitudes sería que permanece constante o que aumenta o disminuye. Por ejemplo, podríamos formular la ley de Boyle, diciendo: si la temperatura de un gas contenido en un recipiente permanece constante y la presión aumenta, entonces el volumen disminuye; cuando la presión disminuye, el volumen aumenta. Ésta también es una ley, ciertamente. Hasta es similar, en algunos aspectos a la ley de Boyle. Pero es mucho más débil que la ley de Boyle, porque no nos permite predecir cantidades específicas de las magnitudes. Sólo podemos predecir que una magnitud aumentará, disminuirá o permanecerá constante.

Los defectos de las versiones cualitativas de las leyes sobre los gases se hacen aun más evidentes si consideramos la ley general que expresa la ecuación $P \cdot V = T \cdot R$. Escribámosla de esta forma:

$$V = \frac{T}{P} \cdot R.$$

A partir de esta ecuación general, interpretada cualitativamente, podemos deducir versiones débiles de la ley de Boyle y la ley de Charles. Supongamos que se hacen variar simultáneamente las tres magnitudes —la presión, el volumen y la temperatura— y que sólo permanece constante la cantidad de gas (R). Hallamos mediante experimentación que aumentan la temperatura y la presión. ¿Qué podemos decir acerca del volumen? En este caso, no podemos decir siquiera si aumenta, disminuye o permanece constante. Para ello, tendríamos que conocer las proporciones en las cua-

les aumentan la temperatura y la presión. Si la temperatura aumentara en mayor proporción que la presión, se deduce de la fórmula que el volumen aumentará. Pero si no podemos asignar valores numéricos a la presión y la temperatura, no podemos predecir nada en absoluto acerca del volumen, en este caso.

Vemos, pues, qué poco se lograría en lo concerniente a predicciones y qué toscas serían las explicaciones de los fenómenos si las leyes de la ciencia sólo fueran cualitativas. Las leyes cuantitativas son enormemente superiores. Para tales leyes debemos disponer, por supuesto, de conceptos cuantitativos. Este es el tema que exploraremos con detalle en el Capítulo V.

Segunda Parte

MEDICIÓN Y LENGUAJE CUANTITATIVO

V

TRES TIPOS DE CONCEPTOS DE LA CIENCIA

Los conceptos de la ciencia, como los de la vida cotidiana, pueden ser divididos en tres grupos principales: clasificatorios, comparativos y cuantitativos.

Por "concepto clasificatorio" entiendo simplemente un concepto que ubica un objeto dentro de una cierta clase. Todos los conceptos taxonómicos de la botánica y la zoología —las diversas especies, familias, géneros, etc.— son conceptos clasificatorios. Varían en la cantidad de información que nos dan acerca de un objeto. Por ejemplo, si digo que un objeto es azul, caliente o cúbico, estoy formulando enunciados relativamente débiles acerca del objeto. Al ubicar el objeto en una clase más restringida, aumenta la información acerca de él, aunque todavía sigue siendo relativamente modesta. El enunciado de que un objeto es un organismo viviente nos dice mucho más acerca de él que el enunciado de que es caliente. "Es un animal", dice un poco más. "Es un vertebrado", dice aun más. A medida que continuamos restringiendo las clases —mamífero, perro, perro de lanas, etc.— vamos aumentando la información, aunque todavía relativamente poco. Los conceptos clasificatorios son los más familiares para nosotros. Las primeras palabras que aprende un niño —"perro", "gato", "casa", "árbol", etc.— son de este tipo.

Mayor información trasmiten los "conceptos comparativos". Desempeñan algo así como un papel intermedio entre los conceptos clasificatorios y los cuantitativos. Creo que es conveniente prestarles atención porque a menudo se pasa por alto, aun entre los científicos, el valor y el poder de tales

conceptos. A menudo se oye decir a un científico: "Ciertamente sería deseable introducir conceptos cuantitativos, conceptos que puedan ser medidos de acuerdo con una escala, en mi campo de estudios; desgraciadamente, esto no se puede hacer. Mi disciplina sólo se halla en su infancia. Aún no hemos elaborado técnicas para la medición, de modo que debemos restringirnos a un lenguaje no cuantitativo, cualitativo. Quizás en el futuro, cuando esta disciplina esté más adelantada, podamos elaborar un lenguaje cuantitativo." El científico puede tener mucha razón al hacer esta declaración pero se equivoca si concluye de ello que, como tiene que hablar en términos cualitativos, debe limitar su lenguaje a los conceptos clasificatorios. Sucede a menudo que, antes de que se puedan introducir conceptos cuantitativos en un ámbito de la ciencia, están precedidos por conceptos comparativos que constituyen herramientas mucho más efectivas para describir, predecir y explicar que los conceptos clasificatorios, que son más toscos.

Un concepto clasificatorio, como "caliente" o "frío", simplemente coloca un objeto en una clase. Un concepto comparativo, como "más caliente" o "más frío", nos dice de qué manera se relaciona un objeto con otro, en términos de mayor o menor. Mucho antes de que la ciencia elaborara el concepto de temperatura, que puede ser medida, era posible decir: "este objeto es más caliente que este otro". Los conceptos comparativos de este tipo pueden ser enormemente útiles. Supongamos, por ejemplo, que treinta y cinco hombres se ofrecen para un trabajo que requiere ciertos tipos de capacidades y que la compañía tiene un psicólogo cuya tarea es determinar los méritos de los solicitantes. Disponer de juicios clasificatorios, por supuesto, es mejor que no disponer de ningún tipo de juicios. El psicólogo puede decidir que cinco de los solicitantes tienen imaginación ágil, diez de ellos tienen imaginación lenta y el resto ni ágil ni lenta. De manera similar, puede hacer clasificaciones aproximadas de los treinta y cinco hombres en términos de sus habilida-

des manuales, su capacidad matemática, su estabilidad emocional, etc. En cierto sentido, claro está, estos conceptos pueden ser utilizados como conceptos comparativos débiles; podemos decir que una persona con "imaginación ágil" es superior, en este aspecto, que una persona con "imaginación pobre". Pero si el psicólogo puede elaborar un método comparativo que ubique a los treinta y cinco hombres en un orden de rango con respecto a cada capacidad, entonces sabremos mucho más acerca de ellos que lo que sabíamos cuando sólo se los clasificaba en las tres clases: fuerte, débil y mediano.

No debemos subestimar nunca la utilidad de los conceptos comparativos, especialmente en dominios en los cuales aún no se han desarrollado el método científico y los conceptos cuantitativos. La psicología está usando los conceptos cuantitativos cada vez más, pero hay aún grandes zonas de la psicología en las cuales sólo es posible aplicar conceptos comparativos. La antropología casi no tiene conceptos cuantitativos. Trabaja principalmente con conceptos clasificatorios y tiene gran necesidad de criterios empíricos con los cuales elaborar conceptos comparativos útiles. En tales campos, es importante elaborar tales conceptos, que son mucho más poderosos que los clasificatorios, aun cuando todavía no sea posible efectuar mediciones cuantitativas.

Quisiera llamar la atención del lector sobre una monografía de Carl G. Hempel y Paul Oppenheim, *Der Typusbegriff im Lichte der neuen Logik*. Apareció en 1936 y su título significa "El concepto de tipo desde el punto de vista de la lógica moderna". Los autores se ocupan especialmente de la psicología y de campos vinculados con ella, en los cuales los conceptos de tipo son, como señalan los autores, más bien pobres. Cuando los psicólogos gastan su tiempo clasificando a los individuos, por ejemplo, en extravertidos, introvertidos e intermedios, u otros tipos de clasificaciones, en realidad no hacen lo mejor que pueden hacer. De cuando en cuando hallamos esfuerzos por introducir criterios empí-

ricos que puedan conducir a valores numéricos, como en la tipología del cuerpo de William Sheldon; pero en la época en la que Hempel y Oppenheim escribieron su monografía era muy escasa la labor realizada en este aspecto. Casi todos los psicólogos que se ocupaban del carácter, la constitución y el temperamento, tenían su propio sistema de tipos. Hempel y Oppenheim señalaron que todas estás diversas tipologías eran poco más que conceptos clasificatorios. Destacaban el hecho de que, si bien sería prematuro introducir conceptos métricos y cuantitativos, se daría un gran paso adelante si los psicólogos pudieran idear conceptos comparativos eficaces.

Sucede a menudo que un concepto comparativo se convierte luego en la base de un concepto cuantitativo. Un ejemplo clásico de esto es el concepto de "más caliente", que llegó a convertirse en el de "temperatura". Antes de entrar en detalles acerca de la forma de establecer criterios empíricos para conceptos numéricos, será útil ver cómo se establecen criterios para conceptos comparativos.

Consideremos el concepto de peso antes de que fuera posible asignarle valores numéricos. Sólo tenemos los conceptos comparativos: más pesado, más liviano y de igual peso. ¿Cuál es el procedimiento empírico por el cual podemos tomar cualquier par de objetos y establecer su relación en términos de estos tres conceptos? Sólo necesitamos una balanza de platillos y estas dos reglas:

1) Si los dos objetos se equilibran en la balanza, son de igual peso.

2) Si los objetos no se equilibran, el objeto del platillo que baja es más pesado que el objeto del platillo que sube.

Hablando estrictamente, aún no podemos decir que un objeto tiene "mayor peso" que el otro, porque todavía no hemos introducido el concepto cuantitativo de peso; pero en la práctica puede usarse tal lenguaje, aunque aún no se disponga de ningún método para asignar valores numéricos al concepto. Hace un momento, por ejemplo, decíamos que

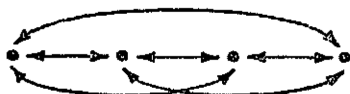
un hombre puede tener "mayor imaginación" que otro, aunque no es posible asignar valores numéricos a la imaginación.

En el ejemplo de la balanza de platillos, así como en otros procedimientos empíricos para establecer conceptos comparativos, es importante distinguir entre esos aspectos del procedimiento que son puramente convencionales y los que no son convencionales porque dependen de hechos de la naturaleza o de leyes lógicas. Para comprender esta distinción enunciemos más formalmente las dos reglas por las cuales definimos los conceptos comparativos de *igualmente pesado, más pesado* y *más liviano*. Con respecto a la igualdad, necesitamos una regla para definir una relación observable correspondiente a la igualdad, a la cual llamaremos "*I*". Para los otros dos conceptos necesitamos una regla para definir una relación a la que llamaré "menos que" y que simbolizaré por "*M*".

Las relaciones *I* y *M* están definidas mediante procedimientos empíricos. Colocamos los dos cuerpos sobre los dos platillos de una balanza. Si observamos que la balanza permanece en equilibrio decimos que la relación *I* rige, con respecto a la propiedad de peso, entre los dos cuerpos. Si observamos que un platillo sube y otro baja, decimos que rige la relación *M*, con respecto al peso entre los dos cuerpos.

Podría parecer que estamos adoptando un procedimiento completamente convencional para definir *I* y *M*, pero no es así. A menos que las dos relaciones que elegimos satisfagan ciertas condiciones, no pueden desempeñar adecuadamente los papeles de *I* y *M*. Por lo tanto, no son relaciones elegidas arbitrariamente. Nuestras dos relaciones se aplican a todos los cuerpos que tienen peso. Este conjunto de objetos es el "dominio" de nuestros conceptos comparativos. Si las relaciones *I* y *M* son válidas para este dominio, debe ser posible ordenar todos los objetos del dominio en una especie de estructura estratificada a la que a veces se llama un "ordena-

miento casi serial". Podremos explicar mejor esto utilizando algunos términos de la lógica de relaciones. La relación *I*, por ejemplo, debe ser "simétrica" (si es válida entre dos cuerpos *a* y *b*, también debe ser válida entre *b* y *a*). También debe ser "transitiva" (si es válida entre *a* y *b* y entre *b* y *c*, también debe ser válida entre *a* y *c*). Podemos diagramar este concepto utilizando puntos que representen cuerpos y flechas dobles que indiquen la relación de igualdad.



Es evidente que si adoptáramos para *I* una relación que no fuera simétrica, esto no sería adecuado para nuestros propósitos. Tendríamos que decir de un objeto que tiene exactamente el mismo peso que otro, pero éste no tiene el mismo peso que el primero. Y no es esta, claro está, la manera como deseamos usar la expresión "igual peso". El equilibrio de la balanza es una relación simétrica. Si dos objetos se equilibran, continuarán haciéndolo aunque cambiemos sus posiciones en los platillos. Por lo tanto, *I* debe ser una relación simétrica. Análogamente, hallamos que si *a* se equilibra con *b* en los platillos y *b* se equilibra con *c*, entonces *a* se equilibra con *c*; la relación *I*, pues, es también transitiva. Si *I* es transitiva y simétrica, también debe ser "reflexiva"; esto es, todo objeto es igual a sí mismo en cuanto al peso. En la lógica de relaciones, una relación que es al mismo tiempo simétrica y transitiva es llamada una relación de "equivalencia". Nuestra elección de la relación *I*, obviamente, no es arbitraria. Elegimos como *I* el equilibrio de los platillos porque se observa que esta relación es una relación de equivalencia.

La relación *M* no es simétrica, sino asimétrica. Si *a* es me-

nos pesado que *b*, *b* no puede ser menos pesado que *a*. *M* es transitiva: si *a* es menos pesado que *b* y *b* menos pesado que *c*, entonces *a* es menos pesado que *c*. Esta transitividad de *M*, al igual que las propiedades de la relación *I*, es tan familiar para nosotros que a menudo olvidamos que debemos realizar una prueba empírica para asegurarnos de que se aplica al concepto de peso. Colocamos *a* y *b* en los dos platillos de la balanza, y *a* baja. Colocamos *b* y *c* en los platillos y *b* baja. *Si* colocamos en los platillos *a* y *c*, esperamos que *a* baje. En un mundo diferente, en el cual no fueran válidas nuestras leyes de la naturaleza, *a* podría subir. Si sucediera esto, entonces la relación que ensayamos no sería llamada transitiva y, por ende, no serviría como *M*.

Podemos diagramar la relación *M*, transitiva y asimétrica, con flechas que van de un punto a otro:



Si las relaciones *I* y *M* son válidas para todos los objetos del dominio, debe ser posible ordenar todos los objetos en el orden casi serial diagramado en la Figura 5-1. En el nivel inferior, el estrato *A*, tenemos todos los objetos que son de igual peso entre sí, pero menos pesados que todos los objetos que no están en este estrato. Puede haber un solo objeto

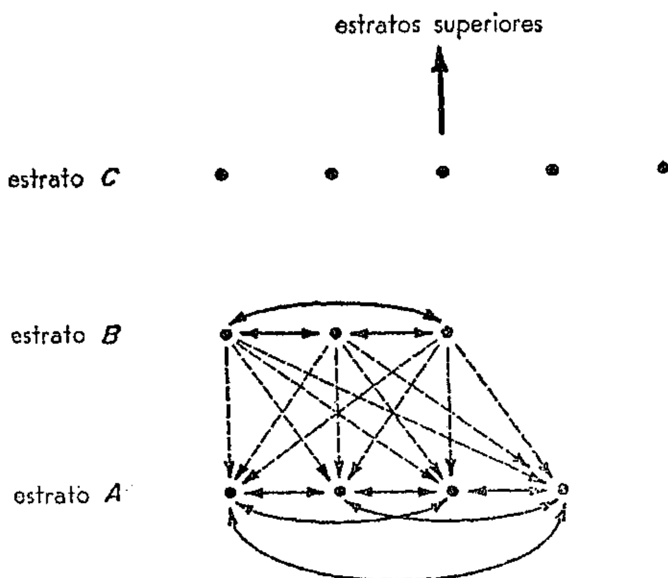


Figura 5-1.

semejante o puede haber muchos miles. La figura 5-1 indica cuatro. En el estrato *B* tenemos otro conjunto de objetos igualmente pesados, todos ellos relacionados entre sí por *I*, todos más pesados que los objetos del estrato *A* y más livianos que todos los objetos que no están en *A* o en *B*. Estos estratos continúan hacia arriba, hasta llegar finalmente al estrato de los objetos más pesados. A menos que los ensayos empíricos revelen que los objetos del dominio pueden ser colocados en este orden casi serial, las relaciones *I* y *M* no serán adecuadas para definir, respectivamente, los conceptos comparativos de igual peso y menor peso.

El lector hallará un examen más detallado de todo esto en las secciones diez y once de la monografía de Hempel

Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science.[1] Hempel dice que *I* y *M* deben satisfacer cuatro condiciones:

1. *I* debe ser una relación de equivalencia.
2. *I* y *M* deben excluirse mutuamente. Ningún par de objetos pueden ser igualmente pesados y al mismo tiempo estar relacionados de tal modo que uno sea menos pesado que el otro.
3. *M* debe ser transitiva.
4. Para dos objetos cualesquiera *a* y *b*, debe darse uno de los tres casos siguientes (en realidad, basta decir que se da al menos uno de ellos; se desprende de las otras condiciones que sólo se cumple exactamente uno):
   (a) *I* se cumple entre los dos objetos.
   (b) *M* se cumple entre *a* y *b*.
   (c) *M* se cumple entre *b* y *a*.

En otras palabras, dos objetos pesados *a* y *b* o bien son de igual peso, o bien *a* es menos pesado que *b*, o bien *b* es menos pesado que *a*.

Si dos relaciones cualesquiera *I* y *M* satisfacen estos cuatro requisitos podemos decir que constituyen un orden casi serial, que puede ser diagramado de la manera estratificada que se indica en la figura 5-1. Por medio de la relación de equivalencia *I* podemos clasificar todos los objetos en clases de equivalencia; luego, con ayuda de la relación *M*, podemos colocar estas clases en un orden serial y, de este modo, desarrollar todo el esquema de estratos ordenados. El punto que quiero destacar aquí es que los conceptos comparativos, dejando de lado la cuestión de si se aplican o no a los hechos de la naturaleza, obedecen a una estructura lógica de relaciones.

Esto no sucede con los conceptos clasificatorios. Al defi-

[1] *International Encyclopedia of United Science* (Chicago: University of Chicago Press, 1952), Vol. 2, Nº 7.

nir un concepto de clase, podemos especificar las condiciones que nos plazca. Por supuesto, si incluimos condiciones lógicamente contradictorias, como hablar de objetos que pesan tres kilos y al mismo tiempo pesan menos que un kilo, estamos definiendo una clase que *no* tiene miembros, en ningún mundo posible. Aparte de esto, somos libres de definir una clase de cualquier manera consistente que deseemos, independientemente de que la clase tenga o no miembros en nuestro mundo. El ejemplo clásico es el concepto de unicornio. Lo definimos como un animal con forma de caballo y con un cuerno recto en su frente. Se trata de una definición perfectamente correcta, en el sentido de que da significado al término "unicornio". Define una clase. No es una clase útil para un zoólogo, porque es vacía en el sentido empírico, no tiene miembros, pero ésta no es una cuestión que deba decidir el lógico.

Con respecto a los conceptos comparativos, la situación es muy diferente. A diferencia de los conceptos de clase, suponen una complicada estructura de relaciones lógicas. Si los introducimos, no somos libres de rechazar o modificar su estructura. Es necesario satisfacer los cuatro requisitos enunciados por Hempel. Así, vemos que hay dos aspectos en los cuales los conceptos comparativos de la ciencia no son totalmente convencionales: deben aplicarse a los hechos de la naturaleza y deben ajustarse a una estructura lógica de relaciones.

Pasamos ahora a los "conceptos cuantitativos". Todo concepto cuantitativo tiene un par correspondiente de conceptos comparativos, los cuales, con el desarrollo de un campo de la ciencia, habitualmente son el primer paso hacia los conceptos cuantitativos. En los ejemplos que hemos utilizado, los conceptos comparativos de menor peso e igual peso conducen fácilmente a un concepto de peso que puede ser medido y expresado mediante números. Examinaremos la naturaleza de los conceptos cuantitativos, la razón de que sean tan útiles, los campos a los que pueden aplicarse y si

hay campos en los cuales no sean aplicables. Este último punto es sumamente importante para la metodología de la ciencia, razón por la cual lo trataremos con mayor detalle. Pero antes de abordar estas cuestiones, haré algunas observaciones generales que adquirirán mayor claridad en el curso de nuestro análisis, pero que deben ser indicadas ahora.

Ante todo, debemos destacar que la diferencia entre lo cualitativo y lo cuantitativo no es una diferencia de naturaleza, sino una diferencia en nuestro sistema conceptual, en nuestro lenguaje, podríamos decir, si por lenguaje entendemos un sistema de concepto. Aquí utilizo la palabra "lenguaje" como lo hace el lógico, no en el sentido en el cual el inglés es un lenguaje y el chino otro. Tenemos el lenguaje de la física, el lenguaje de la antropología, el lenguaje de la teoría de conjuntos, etc. En este sentido un lenguaje está constituido por reglas para el vocabulario, reglas para construir oraciones, reglas para efectuar deducciones lógicas a partir de estas oraciones, etc. Los tipos de conceptos que aparecen en un lenguaje científico son sumamente importantes. Lo que deseo aclarar es que la diferencia entre lo cualitativo y lo cuantitativo es una diferencia entre lenguajes.

El lenguaje cualitativo se limita a los predicados (por ejemplo, "el pasto es verde"), mientras que el lenguaje cuantitativo introduce lo que se llaman símbolos functores, esto es, símbolos para funciones que tienen valores numéricos. Esto es importante, porque existe la difundida opinión, especialmente entre los filósofos, de que hay dos tipos de características en la naturaleza, las cualitativas y las cuantitativas. Algunos filósofos sostienen que la ciencia moderna, debido a que restringe cada vez más su atención a las características cuantitativas, desprecia los aspectos cualitativos de la naturaleza y, de este modo, ofrece un cuadro del mundo totalmente distorsionado. Esta concepción es totalmente errónea, como puede verse si se introduce la distinción en el lugar apropiado. Cuando contemplamos la naturaleza, no

podemos preguntar: "¿Son esos fenómenos que veo cualitativos o cuantitativos?" Esta no es la pregunta correcta. Si alguien describe esos fenómenos en ciertos términos, definiendo estos términos y dándonos reglas para su uso, entonces podemos preguntar: "¿Son estos los términos de un lenguaje cuantitativo o los de un lenguaje precuantitativo, cualitativo?"

Otro punto importante es que las convenciones desempeñan un papel muy importante en la introducción de conceptos cuantitativos. No debemos pasar por alto este papel. Por otra parte, también debemos tener cuidado de no sobreestimar el aspecto convencional. Esto no sucede a menudo, pero algunos filósofos lo han hecho. Hugo Dingler, en Alemania, es un ejemplo de ello, pues llegó a una concepción totalmente convencionalista que considero errónea. Decía que todos los conceptos, y aun las leyes de la ciencia, son materia de convención. En mi opinión, esto es ir demasiado lejos. Poincaré también ha sido acusado de convencionalismo en este sentido radical, pero creo que esto se debe a una interpretación equivocada de sus escritos. Es cierto que a menudo ha destacado el importante papel de las convenciones en la ciencia, pero también era muy consciente de los componentes empíricos que intervienen. Sabía que no siempre somos libres de hacer elecciones arbitrarias en la construcción de un sistema científico; tenemos que acomodar nuestro sistema a los hechos de la naturaleza a medida que los descubrimos. La naturaleza aporta a las situaciones factores que están fuera de nuestro control. Poincaré puede ser llamado un convencionalista sólo se entiende por esto que destacaba más que los filósofos anteriores el importante papel de las convenciones. Pero no era un convencionalista radical.

Antes de abordar el papel de la medición en la elaboración de conceptos cuantitativos, debemos mencionar que hay un método cuantitativo básico y más simple, el método de contar. Si no fuéramos primero capaces de contar tam-

poco seríamos capaces de medir. El acto de contar no supone más que los enteros no negativos. Digo "enteros no negativos" y no "enteros positivos", porque el cero es también el resultado de contar si damos a la palabra un sentido suficientemente amplio. Dada una clase finita —por ejemplo, la clase de todas las sillas de una habitación—, contar es el método por el cual determinamos el número cardinal de esta clase. Contamos las sillas —una, dos, tres, etc.— hasta que terminamos, por ejemplo, en veinte. Supongamos que deseamos contar el número de pianos que hay en una habitación. Miramos a nuestro alrededor y no vemos ningún piano; decimos entonces que el número cardinal es cero. Este puede ser considerado como un caso degenerado del contar. Sea como fuere, cero es un entero y puede ser aplicado a una clase como su número cardinal. En tales casos, habitualmente la llamamos una clase nula.

El mismo procedimiento de contar nos da el número cardinal de una clase finita de sucesos consecutivos. Contamos el número de veces que oímos el trueno durante una tormenta o el número de campanadas de un reloj. Es probable que este tipo de enumeración apareciera antes en la historia que el recuento de clases de cosas simultáneas, como sillas de una habitación. En realidad, es la manera como un niño aprende a contar. Camina por la habitación y toca cada silla individual a la par que enuncia las palabras que expresan números. Lo que él cuenta, en realidad, es una serie de toques. Si se le pide a un niño que cuente un grupo de árboles situados a cierta distancia, hallará difícil hacerlo porque le cuesta señalar los árboles uno por uno y poner en práctica alguna especie de este procedimiento de toque. Pero si logra contar cada uno de los actos de señalamiento, asegurándose de que señala cada árbol una vez y sólo una vez, entonces decimos que hay un isomorfismo entre el número de árboles y el número de actos de señalamiento. Si el número de estos actos es ocho, atribuimos el mismo número cardinal a los árboles situados a distancia.

Un niño mayor o un adulto puede ser capaz de contar los árboles sin señalarlos. Pero, a menos que se trate de un número pequeño, como tres o cuatro, que puede ser determinado de una mirada, concentrará primero su atención en un árbol, luego en otro, etc. El procedimiento sigue siendo el de contar acontecimientos sucesivos. Puede demostrarse mediante una prueba formal que el número cardinal obtenido de esta manera es realmente el número cardinal de la clase, pero no entraremos aquí en sus detalles. Lo importante es que, al contar una clase de objetos, realmente contamos otra cosa: una serie de sucesos. Hacemos entonces una inferencia sobre la base de un isomorfismo (una correspondencia biunívoca entre sucesos y objetos) y llegamos a la conclusión de que el número de sucesos es el número cardinal de la clase.

Un lógico siempre encuentra muchas complicaciones en cosas simples. Hasta el acto de contar, el más simple de todos los métodos cuantitativos, sometido a análisis, resulta no ser tan simple como parece a primera vista. Pero una vez que sabemos contar, podemos continuar aplicando reglas para la medición, como explicaremos en el Capítulo VI.

VI

LA MEDICIÓN DE CONCEPTOS CUANTITATIVOS

Para describir los hechos de la naturaleza mediante conceptos cuantitativos, conceptos con valores numéricos, debemos disponer de procedimientos para llegar a esos valores. El más simple de tales procedimientos, como vimos en el capítulo anterior, es contar. En este capítulo, examinaremos los procedimientos de medición más refinados. Contar sólo permite obtener valores que se expresan mediante números enteros. La medición va más allá. No sólo brinda valores que pueden ser expresados por números racionales (enteros y fracciones), sino también valores que pueden ser expresados por números irracionales. Esto permite aplicar herramientas matemáticas poderosas, como el cálculo infinitesimal, incrementando la eficiencia del método científico.

El primer punto importante que debemos comprender claramente es que, para dar significado a términos como "longitud" y "temperatura", debemos disponer de reglas para el proceso de medición. Estas reglas no nos dicen sino cómo asignar un cierto número a un cierto cuerpo o proceso, de modo que podamos decir que este número representa el valor de la magnitud de ese cuerpo. Tomemos como ejemplo el concepto de temperatura, junto con un esquema de cinco reglas. Las reglas enuncian el procedimiento por el cual puede medirse la temperatura.

Las dos primeras reglas de este esquema son las mismas dos reglas que examinamos en el capítulo anterior como reglas para definir conceptos comparativos. Pero ahora las consideraremos como reglas para definir un concepto cuantitativo, al que llamaremos magnitud *M*.

La Regla 1, para la magnitud M, especifica una relación empírica I. La regla expresa que, si vale la relación I_M entre objetos a y b, los dos objetos tendrán valores iguales de la magnitud M. En símbolos:

$$\text{Si } I_M (a, b) \text{ entonces } M (a) = M(b).$$

La Regla 2 especifica una relación empírica L_M. Esta regla dice que, si vale la relación L_M entre a y b, el valor de la magnitud M será menor para a que para b. En símbolos:

$$\text{Si } L_M (a, b), \text{ entonces } M(a) < M(b).$$

Antes de continuar con las otras tres reglas de nuestro esquema, veamos cómo se aplicaron estas dos reglas, primero al concepto precientífico comparativo de temperatura, luego a procedimientos cuantitativos. Imaginémonos que estamos viviendo en una época anterior a la invención de los termómetros. ¿Cómo establecemos si dos objetos están igualmente calientes o si uno de ellos está menos caliente que el otro? Tocamos cada objeto con la mano. Si no sentimos a ninguno de ellos más caliente que el otro (relación I), decimos que están igualmente calientes. Si sentimos que a está menos caliente que b (relación L), decimos que a está menos caliente que b. Pero estos métodos son subjetivos, sumamente imprecisos y es difícil lograr un acuerdo acerca de ellos entre diferentes observadores. Una persona puede sentir a más caliente que b; otra persona que toque los mismos dos objetos puede pensar que es cierto lo contrario. Los recuerdos de las sensaciones de calor son tan vagos que puede resultarle imposible a una persona decidir si un objeto está más caliente en un instante determinado que tres horas antes. Por tales razones, los métodos subjetivos para establecer las relaciones "igualmente caliente" (I) y "menos caliente" (L) son muy poco útiles en la búsqueda empírica de leyes generales. Se necesita un método objetivo para determinar la temperatura, un método más preciso que nuestras sensaciones de calor y acerca del cual puedan

ponerse habitualmente de acuerdo personas diferentes.

El termómetro nos brinda tal método. Supóngase que deseamos determinar los cambios en la temperatura del agua contenida en un recipiente. Sumergimos un termómetro de mercurio en el agua. Cuando se calienta el agua, el mercurio se dilata y asciende en el tubo. Cuando el agua se enfría, el mercurio se contrae y desciende. Si se hace una marca en el tubo para indicar la altura del mercurio, es tan fácil ver si el mercurio está por encima o por debajo de la marca que es escasa la probabilidad de que dos observadores discrepen a este respecto. Si observamos hoy que el líquido está por encima de la marca, no tendremos dificultad para recordar que ayer estaba por debajo de la marca. Puedo declarar, entonces, con la mayor confianza, que el termómetro registra hoy una temperatura mayor que ayer. Es fácil comprender de qué manera es posible definir mediante este instrumento las relaciones I_T y L_T para la magnitud T (temperatura). Simplemente, colocamos el termómetro en contacto con el cuerpo a, esperamos hasta que no se produzca ningún cambio en la altura del líquido de prueba y luego marcamos el nivel del líquido. Aplicamos el termómetro de la misma manera al objeto b. La relación I queda definida por el ascenso del líquido a la misma marca. Se establece la relación L entre a y b si el líquido asciende hasta su punto inferior cuando se lo aplica a a que cuando se lo aplica a b.

Es posible expresar simbólicamente las dos primeras reglas para definir la temperatura (T) de la siguiente manera:

Regla 1: Si $I_T(a,b)$, entonces $T(a) = T(b)$.
Regla 2: Si $L_T(a,b)$, entonces $T(a) < T(b)$.

Obsérvese que no es necesario, para establecer las dos relaciones I y L, tener una escala de valores marcada en el tubo. Pero si queremos usar el termómetro para asignar valores numéricos a T, necesitamos algo más que las dos reglas.

Las tres reglas restantes de nuestro esquema suministran

las condiciones adicionales requeridas. La Regla 3 nos dice cuándo asignar un valor numérico particular, habitualmente cero, a la magnitud que intentamos medir. Para esto, la misma especifica un estado fácilmente reconocible y, a veces, fácilmente reproducible, y prescribe asignar el valor numérico elegido a un objeto si se encuentra en este estado. Por ejemplo, en la escala centígrada de temperaturas, la Regla 3 asigna el valor cero al agua cuando se halla en estado de congelación. Luego agregaremos algunas reservas acerca de las condiciones en las cuales es adecuada esta regla; por el momento la aceptaremos tal cual.

La Regla 4, habitualmente llamada la regla de la unidad, asigna un segundo valor especial de la magnitud a un objeto, especificando otro estado fácilmente reconocible y reproducible de este objeto. Este segundo valor habitualmente es 1, pero puede ser cualquier número diferente del especificado por la Regla 3. En la escala centígrada es 100. Se le asigna al agua en estado de ebullición. Una vez asignado el segundo valor, se dispone de una base para definir unidades de temperatura. Colocamos el termómetro en el agua congelada, marcamos la altura del mercurio y le ponemos cero. Luego colocamos el termómetro en agua en ebullición, marcamos la altura del líquido y le ponemos 100. Aún no disponemos de una escala, pero tenemos una base para hablar de unidades. Si el mercurio sube de la marca cero a la marca 100, podemos decir que la temperatura ha subido 100 grados. Si hubiéramos rotulado a la marca más elevada con el número 10, en lugar de 100, diríamos que la temperatura ha subido diez grados.

El paso final es determinar la forma precisa de la escala. Se lo hace mediante la Regla 5, la más importante de todas. Ella especifica las condiciones empíricas ID_M en las cuales diremos que dos diferencias (D) en los valores de la magnitud (M) son iguales. Obsérvese que no hablamos de dos valores, sino de dos *diferencias* entre dos valores. Queremos especificar las condiciones empíricas en las cuales diremos

que la diferencia entre dos valores cualesquiera de las magnitudes de a y b es la misma que la diferencia entre otros dos valores, digamos de c y d. Esta quinta regla adopta la siguiente forma simbólica:

$$\text{Si } ID_M(a,b,c,d), \text{ entonces } M(a) - M(b) = M(c) - M(d).$$

La regla nos dice que si se cumplen ciertas condiciones empíricas, representadas por "ID_M" en la formulación simbólica, para cuatro valores de la magnitud, podemos decir que la diferencia entre los dos primeros valores es la misma que la diferencia entre los otros valores.

En el caso de la temperatura, las condiciones empíricas se relacionan con el volumen de la sustancia de prueba usada en el termómetro, en nuestro caso, el mercurio. Debemos construir el termómetro de modo que, cuando la diferencia entre dos volúmenes cualesquiera de mercurio, a y b, es igual a las diferencias entre otros dos volúmenes, c y d, la escala dará diferencias iguales de la temperatura.

Si el termómetro tiene una escala centígrada, el procedimiento para satisfacer las condiciones de la Regla 5 es simple. Se introduce el mercurio en una ampolleta de uno de los extremos de un tubo muy delgado. La delgadez del tubo no es esencial, pero tiene gran valor práctico porque facilita la observación de cambios sumamente pequeños del volumen del mercurio. El tubo de vidrio debe ser elaborado cuidadosamente, para que su diámetro interior sea uniforme. Como resultado de esto, los aumentos iguales en el volumen del mercurio pueden ser observados como distancias iguales entre marcas colocadas a lo largo del tubo. Si indicamos por "$d(a,b)$" la distancia entre las marcas cuando el termómetro está en contacto con el cuerpo a y con el cuerpo b, entonces la Regla 5 puede ser expresada simbólicamente del siguiente modo:

$$\text{Si } d(a,b) = d(c,d), \text{ entonces } T(a) - T(b) = T(c) - T(d).$$

Aplicamos ahora las Reglas 3 y 4. Se coloca el termómetro en agua congelada y se usa "0" para marcar el nivel del mercurio en el tubo. Se coloca luego el termómetro en agua en ebullición y se marca el nivel del mercurio con "100". Sobre la base de la Regla 5, ahora es posible marcar en el tubo cien intervalos espaciales iguales entre las marcas 0 y 100. Estos intervalos pueden ser prolongados por debajo de cero hasta llegar al punto en el que el mercurio se congela. También se los puede continuar por encima de 100 hasta el punto en el cual el mercurio hierve y se evapora. Si dos físicos construyen sus termómetros de esta manera y concuerdan en todos los procedimientos especificados por las cinco reglas, llegarán a resultados idénticos cuando midan la temperatura del mismo objeto. Expresamos este acuerdo diciendo que los dos físicos usan la misma escala de temperatura. Las cinco reglas determinan una escala única para la magnitud a la cual se aplican.

¿Cómo hacen los físicos para decidir el tipo exacto de escala que usarán para medir una magnitud? Sus decisiones son, en parte, convencionales, especialmente las relativas a la elección de los puntos indicados en las Reglas 3 y 4. La unidad de longitud, el metro, se define ahora como la longitud, en el vacío, de 1.656.763,83 longitudes de onda de un cierto tipo de radiación de un átomo de criptón 86. La unidad de masa o peso, el kilogramo, se basa en un prototipo conservado en París. Con respecto a la temperatura, medida con una escala centígrada, 0 y 100 son asignados, por razones de conveniencia, al agua congelada y al agua en ebullición. En la escala Fahrenheit y en la llamada escala absoluta, o Kelvin, se eligen otros estados de las sustancias como puntos 0 y 100. Pero las tres escalas se basan, esencialmente, en los procedimientos de la quinta regla y, por lo tanto, pueden ser consideradas de la misma forma. Un termómetro para medir temperatura en grados Fahrenheit se construye exactamente de la misma manera que un termómetro para medir grados centígrados;

sólo difieren en la manera de calibrarlos. Por esta razón, es muy simple el paso de una escala a otra.

Si dos físicos adoptan procedimientos totalmente diferentes como quinta regla —por ejemplo, un físico puede correlacionar la temperatura con la dilatación de volumen del mercurio y otro con la dilatación de una barra de hierro o con el efecto del calor sobre el flujo de electricidad por un determinado aparato—, entonces sus escalas tendrán formas muy diferentes. Las dos escalas, por supuesto, pueden coincidir en lo que respecta a las Reglas 3 y 4. Si todos los físicos eligen la temperatura de congelación y la de ebullición del agua como puntos de referencia para determinar sus unidades, entonces, claro está, coincidirán cuando midan la temperatura de congelación o la de ebullición del agua. Pero cuando apliquen sus respectivos termómetros a determinada caldera de agua caliente es probable que obtengan resultados diferentes, y puede no haber una manera simple de pasar de una escala a otra.

Las leyes basadas en dos escalas diferentes no tienen la misma forma. Una escala puede conducir a leyes que quizás sea posible expresar mediante ecuaciones muy simples. La otra escala puede conducir a leyes que requieran ecuaciones muy complejas. Es este último punto el que da tanta importancia a la elección de los procedimientos de la quinta regla, a diferencia del carácter más arbitrario de las Reglas 3 y 4. Un científico elige estos procedimientos con el propósito de simplificar todo lo posible las leyes básicas de la física.

En el caso de la temperatura, es la escala absoluta, o Kelvin, la que conduce a la mayor simplificación de las leyes de la termodinámica. Las escalas centígrada y Fahrenheit pueden ser consideradas como variantes de la escala absoluta, que sólo difieren en la calibración y que pueden ser traducidas fácilmente a la escala absoluta. En los primeros termómetros, se usaban como sustancias de prueba

líquidos como el alcohol y el mercurio, así como también gases que se mantuvieran a presión constante de modo que los cambios de temperatura alteraran su volumen. Se descubrió que cualesquiera que sean las sustancias utilizadas, se podrían establecer tipos de escala aproximadamente idénticos; pero cuando se construyeron instrumentos más precisos, pudieron observarse pequeñas diferencias. No quiero decir solamente que las sustancias se dilatan en proporciones diferentes cuando se las calienta, sino también que la forma misma de la escala es un poco diferente según que se use como sustancia de prueba el mercurio o el hidrógeno. Posteriormente, los científicos eligieron la escala absoluta por ser la que conduce a las leyes más simples. El hecho sorprendente es que esta escala no era determinada por la naturaleza de una sustancia de prueba particular. Está más cerca de la escala del hidrógeno o de cualquier otro gas que de la del mercurio, pero no es exactamente igual a ninguna escala basada en un gas. A veces se dice que es una escala basada en un "gas ideal", pero esta sólo es una manera de hablar.

En la práctica, por supuesto, los científicos continúan usando termómetros que contienen mercurio u otros líquidos de prueba cuyas escalas son muy próximas a la escala absoluta; luego convierten las temperaturas basadas en esta escala a la escala absoluta, por medio de ciertas fórmulas de corrección. La escala absoluta permite la formulación de leyes termodinámicas de la manera más simple posible, porque sus valores expresan cantidades de energía, y no cambios de volumen de diversas sustancias. Las leyes en las que interviene la temperatura serían mucho más complicadas si se utilizara alguna otra escala.

Es importante comprender que no podemos decir realmente cuál es el significado de una magnitud cuantitativa hasta que formulamos reglas para medirla. Podría pensarse que la ciencia primero elabora un concepto cuantitativo y luego busca las maneras de medirlo. Pero el concepto cuan-

titativo, en realidad, se desarrolla a partir del proceso de medición. El concepto de temperatura sólo pudo recibir un significado preciso cuando se inventaron los termómetros. Einstein destacó este punto en los análisis que condujeron a la teoría de la relatividad. Se ocupó primordialmente de la medición del espacio y del tiempo. Destacó que no podemos saber exactamente qué significan conceptos tales como "igualdad de duración", "igualdad de distancia (en el espacio)", "simultancidad de dos sucesos que se producen en lugares diferentes", etc., sin especificar los recursos y reglas mediante los cuales se miden tales conceptos.

En el Capítulo V vimos que había tanto aspectos convencionales como no convencionales en los procedimientos adoptados según las Reglas 1 y 2. Una situación similar se encuentra en lo que respecta a las Reglas 3, 4 y 5. Hay cierta amplitud de elección para decidir los procedimientos relacionados con estas reglas; en esta medida, estas reglas son cuestión de convención. Pero no son enteramente convencionales. Es necesario un conocimiento fáctico para poder decidir cuáles tipos de convenciones pueden ser elaborados sin entrar en conflicto con los hechos de la naturaleza, y es menester aceptar diversas estructuras lógicas para evitar inconsistencias lógicas.

Por ejemplo, decidimos adoptar el punto de congelación del agua como punto 0 de nuestra escala de temperaturas porque sabemos que el volumen de mercurio de nuestro termómetro será siempre el mismo toda vez que coloquemos el extremo del instrumento en agua congelada. Si halláramos que el mercurio se eleva a una cierta altura cuando usamos agua obtenida en Francia y a una altura diferente cuando usamos agua obtenida en Dinamarca o que la altura varía según la cantidad de agua que congelamos, entonces el agua en congelación no sería una elección adecuada para aplicar la tercera regla.

Un elemento empírico similar interviene, evidentemente, en nuestra elección del agua en ebullición para indicar el

punto 100. Es un hecho de la naturaleza, y no el resultado de una convención, el que la temperatura de toda agua en ebullición sea la misma. (Suponemos que ya hemos establecido las Reglas 1 y 2, de modo que podemos medir la igualdad de temperaturas.) Pero aquí debemos introducir una reserva. La temperatura del agua en ebullición es la misma en una misma localidad, pero en una montaña elevada, donde la presión del aire es menor, el agua hierve a una temperatura ligeramente inferior que al pie de la montaña. Para poder utilizar el punto de ebullición del agua con el fin de satisfacer los requisitos de la cuarta regla, debemos agregar que es menester usar agua en ebullición a una cierta altura o aplicar un factor de corrección si no se está a esa altura. Hablando estrictamente, aun a la altura especificada debemos asegurarnos, por medio de un barómetro, que estamos a cierta presión atmosférica especificada o, de lo contrario, aplicar también en este caso un factor de corrección. Estas correcciones dependen de hechos empíricos. No son factores convencionales introducidos arbitrariamente.

Al buscar criterios empíricos para aplicar la Regla 5, que determinan la forma de nuestra escala, tratamos de obtener una forma que nos brinde las leyes más simples posibles. También en este caso entra un aspecto convencional en la elección de la regla, porque los hechos de la naturaleza determinan las leyes que tratamos de simplificar. Finalmente, el uso de números como valores de nuestra escala supone una estructura de relaciones lógicas que no son convencionales porque no podemos abandonarlas sin incurrir en contradicciones lógicas.

VII

MAGNITUDES EXTENSAS

La medición de la temperatura requiere, como vimos en el Capítulo VI, un esquema de cinco reglas. ¿Hay conceptos de la física que puedan ser medidos mediante el uso de esquemas más simples? Sí, un gran número de magnitudes, llamadas "magnitudes extensas", son medibles con ayuda de esquemas de tres reglas.

Los esquemas de tres reglas se aplican a situaciones en las cuales es posible combinar o juntar de alguna manera dos cosas para producir una tercera, y el valor de una magnitud *M* de esta nueva cosa será la suma de los valores de *M* para las dos cosas combinadas. El peso, por ejemplo, es una magnitud extensa. Si colocamos juntos un objeto de cinco kilogramos y otro de dos, el peso de los objetos combinados será de siete kilogramos. La temperatura no es una magnitud de este tipo. No hay ninguna operación simple mediante la cual podamos tomar un objeto que tiene una temperatura de 60°, combinarlo con otro objeto que tiene una temperatura de 40° y obtener un nuevo objeto con una temperatura de 100°.

Las operaciones mediante las cuales se combinan las magnitudes extensas varían enormemente de una magnitud a otra. En los casos más sencillos la operación consiste simplemente en unir dos cuerpos, pegándolos, atándolos o colocándolos meramente uno junto al otro, como dos pesos en el mismo platillo de una balanza. En la vida cotidiana abundan los ejemplos. El ancho de una hilera de libros de un anaquel es la suma de los anchos individuales de los libros. Tomamos un libro y leemos diez páginas. Más tarde

leemos otras diez páginas. En total, hemos leído veinte páginas. Después de llenar parcialmente una bañera, comprobamos que el agua está demasiado caliente y agregamos un poco de agua fría. El volumen total de agua en la bañera será la suma de las cantidades de agua caliente y agua fría que pasaron por las canillas. A menudo no se enuncia explícitamente el procedimiento exacto para combinar cosas con respecto a una cierta magnitud extensa. Se trata de una costumbre riesgosa que puede provocar mucha confusión y muchos malentendidos. Puesto que hay muchas maneras diferentes de combinar las cosas, es importante no dar por supuesto que se conoce el método de combinación: él debe ser enunciado explícitamente y definido claramente. Una vez hecho esto, puede medirse la magnitud utilizando un esquema de tres reglas.

La primera regla estipula lo que se llama el principio de adición o de "aditividad". Este principio dice que, cuando un objeto combinado se forma a partir de dos componentes, el valor de la magnitud para este objeto es la suma aritmética de los valores de la magnitud para los dos componentes. Toda magnitud que satisfaga esta regla es llamada una "magnitud aditiva". El peso es un ejemplo familiar. La operación de conjunción es, en este caso, simplemente colocar juntos dos objetos y pesarlos como si fueran un solo objeto. Colocamos el objeto *a* en el platillo y observamos su peso. Lo reemplazamos por el objeto *b* y observamos su peso. Luego colocamos ambos objetos en la balanza. Este nuevo objeto, que no es sino *a* y *b* tomados juntamente, tendrá, por supuesto, un peso que es la suma aritmética de los pesos de *a* y *b*.

Si esta es la primera vez que el lector da con esta regla, puede considerar extraño que mencionemos siquiera una regla tan trivial. Pero en el análisis lógico del método científico debemos hacer explícito todo, inclusive cuestiones que el hombre común da por supuestas y raramente expresa en palabras. Naturalmente, nadie pensaría que, si se coloca

una piedra de cinco kilos en una balanza junto con una piedra de siete kilos, la balanza registraría un peso total de setenta kilos o de tres kilos. Damos por supuesto que el peso combinado será de doce kilos. Pero es concebible que en algún otro mundo la magnitud peso no se comporte de una manera aditiva tan conveniente. Por lo tanto, debemos hacer explícita la aditividad del peso introduciendo esta regla: si se juntan dos cuerpos y se los pesa como si fueran uno solo, el peso total será la suma aritmética de los pesos componentes.

Es necesario introducir reglas similares para toda magnitud extensa. La longitud espacial es otro ejemplo familiar. Un cuerpo tiene un borde recto *a*. Otro cuerpo tiene un borde recto *b*. Colocamos los dos juntos de modo que sus extremos se toquen y se hallen alineados. Esta nueva entidad física —la línea recta formada por la combinación de *a* y *b*— tendrá una longitud que es la suma de las longitudes de *a* y *b*.

Las antiguas formulaciones de la regla aditiva para la longitud frecuentemente eran muy insatisfactorias. Por ejemplo, algunos autores decían que si se agregan dos segmentos de rectas *a* y *b*, la longitud del nuevo segmento se obtiene agregando la longitud de *b* a la longitud de *a*. Esta es una manera sumamente defectuosa de formular la regla porque en la misma oración se usa "agregar" de dos maneras muy diferentes. Primero se la usa en el sentido de unir dos objetos físicos colocándolos juntos de una manera específica, y luego se la usa en el sentido de la operación aritmética de adición. Estos autores aparentemente ignoraban que los dos conceptos son diferentes, porque procedían a simbolizar la regla de esta manera:

$$L(a + b) = L(a) + L(b)$$

Algunos autores, a los cuales admiro por otros conceptos, incurrían en esta confusa formulación, una formulación que traduce en símbolos el mismo uso doble de la palabra

"agregar". El segundo símbolo "+" designa una operación aritmética pero el primer "+" no es una operación aritmética en absoluto. No se puede sumar aritméticamente dos líneas. Lo que se suma no son las líneas, sino los números que representan a las longitudes de las líneas. Las líneas no son números; son configuraciones en el espacio físico. Siempre he insistido en que debe hacerse una distinción entre la adición aritmética y el tipo de adición que consiste en la operación física de combinar. Nos ayudará a recordar esta distinción la adopción del procedimiento de Hempel (quien ha escrito mucho acerca de las magnitudes extensas) consistente en introducir un símbolo especial, un pequeño círculo, "o" para la operación física de unión. Este procedimiento permite simbolizar de una manera mucho más satisfactoria la regla aditiva para la longitud:

$$L(a \circ b) = L(a) + L(b)$$

La combinación de longitudes puede ser diagramada así:

$$\underbrace{\underbrace{\overset{a}{\rule{2cm}{0.4pt}}}_{L(a)}\underbrace{\overset{b}{\rule{1.5cm}{0.4pt}}}_{L(b)}}_{L(a \circ b)} \qquad [\text{no "}L(a+b)\text{"}]$$

En el caso del peso no interesa cómo se coloquen los dos cuerpos juntos en el platillo, pero *sí* interesa en el caso de la longitud. Supóngase que los dos segmentos se colocan de este modo:



Los segmentos se tocan por los extremos pero no están en línea recta. La distancia entre los puntos *A* y *C* no es la

suma de las longitudes de *a* y *b*. Por eso, siempre debemos tener el cuidado de especificar exactamente qué queremos decir mediante la operación de unión.

Ahora podemos simbolizar el principio general de aditividad, con respecto a cualquier magnitud extensa *M*, escribiendo:

$$M(a \circ b) = M(a) + M(b)$$

En este enunciado, el símbolo "o" indica un procedimiento específico para unir *a* y *b*. Será mejor que consideremos a esta regla como la segunda, y no como la primera, de nuestro esquema de tres reglas. La primera regla, más simple, es la regla de la igualdad. Es igual a la primera regla del esquema de cinco reglas para medir la temperatura. Especifica el procedimiento por el cual definimos la igualdad de magnitud. En el caso del peso, decimos que dos cuerpos tienen el mismo peso si, cuando se los coloca en los dos platillos de la balanza, ésta permanece en equilibrio.

La tercera regla corresponde a la Regla 4 del esquema para la temperatura. Especifica la unidad de valor de la magnitud. Esto se hace habitualmente eligiendo un objeto o un proceso natural que puede ser reproducido fácilmente, y luego definiendo la unidad de valor en términos de este objeto o proceso. Mencioné antes dos ejemplos: el metro, basado en determinado número de longitudes de onda de un cierto tipo de luz, y el kilogramo, basado en un prototipo internacional que se encuentra en París. El metro y el kilogramo son las unidades patrones de longitud y de peso en el sistema métrico de medidas. Para resumir, nuestro esquema de la medición de cualquier magnitud extensa consiste en las tres reglas siguientes:

1. La regla de la igualdad.
2. La regla de la aditividad.
3. La regla de la unidad.

Puesto que este esquema es más simple que el examinado anteriormente de cinco reglas, ¿por qué no se lo usa siempre? La respuesta, por supuesto, es que para muchas magnitudes no hay ninguna operación de unión que suministre una base para el principio de aditividad. Ya hemos visto que la temperatura no es una magnitud aditiva. La altura del sonido y la dureza de los cuerpos son otros dos ejemplos. Con respecto a estas magnitudes no podemos hallar una operación de unión que sea aditiva. Tales magnitudes son llamadas "no extensas". Pero hay un gran número de magnitudes aditivas en la física y, con respecto a todas ellas, el anterior esquema de tres reglas suministra una base adecuada para la medición.

Muchos científicos y filósofos de la ciencia consideran sinónimas las expresiones "magnitudes extensas" y "magnitudes aditivas", pero hay algunos autores que hacen una diferencia entre ellas. Si establecemos tal distinción, se la debe efectuar de la siguiente manera. Decimos que una magnitud es extensa si podemos concebir una operación que sea una operación natural de unión y para la cual pueda construirse una escala. Si luego descubrimos que con respecto a la escala y a la operación elegidas, rige el principio de aditividad, podemos llamarla también una magnitud aditiva. Podemos decir que es una magnitud aditiva-extensa. Pero si el principio aditivo no rige, la llamamos una magnitud extensa-no aditiva.

Casi todas las magnitudes extensas de la física son aditivas, pero hay algunas excepciones. Un ejemplo notable es la velocidad relativa en la teoría especial de la relatividad. En la física clásica, las velocidades relativas a lo largo de una línea recta son aditivas en la siguiente acepción. Si los cuerpos A, B y C se mueven a lo largo de una recta en el mismo sentido, y la velocidad de B relativa a A es V_1 y la velocidad de C relativa a B es V_2, entonces, en física clásica, la velocidad V_3 de C relativa a A es considerada simplemente igual a $V_1 + V_2$. Si se camina por el pasillo central

de un avión que vuela hacia el Oeste, ¿cuál es nuestra velocidad hacia el Este relativa al piso? Antes de la teoría de la relatividad la respuesta habría consistido simplemente en sumar la velocidad del avión a la nuestra. Hoy sabemos que las velocidades relativas no son aditivas; debe utilizarse una fórmula especial en la cual la velocidad de la luz es uno de los términos. Cuando las velocidades son pequeñas en relación con la de la luz, se las puede tratar como si fueran aditivas; pero cuando las velocidades son muy grandes, debe usarse la fórmula siguiente, en la cual c es la velocidad de la luz:

$$V_3 = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{V_1 V_2}{c^2}}$$

Imaginemos, por ejemplo, que la nave espacial B se mueve en una trayectoria recta y pasa el planeta A con una velocidad V_1 relativa a éste. La nave espacial C, que viaja en el mismo sentido, pasa a la nave espacial B con una velocidad V_2 (relativa a B). ¿Cuál es la velocidad relativa, V_3, de la nave espacial C con respecto al planeta A? Si las velocidades V_1 y V_2 de las naves espaciales son pequeñas, entonces el valor de la fracción que es menester sumar a 1, debajo de la línea de la parte derecha de la fórmula, será tan pequeña que se la puede ignorar. Entonces, obtenemos V_3 simplemente sumando V_1 y V_2. Pero si las naves espaciales viajan a velocidades muy grandes, es necesario tomar en consideración la velocidad de la luz, c. V_3 se alejará significativamente de la simple suma de V_1 y V_2. Si estudiamos la fórmula, veremos que, por mucho que las velocidades relativas de las naves espaciales se acerquen a la velocidad de la luz, la suma de las dos velocidades no puede superar a ésta. Llegamos a la conclusión, entonces, de que la velocidad relativa en la teoría especial de

la relatividad es extensa (porque es posible especificar una operación de unión) pero no aditiva.

Otros ejemplos de magnitudes extensas-no aditivas son las funciones trigonométricas de los ángulos. Suponga el lector que tiene un ángulo α entre los bordes rectos L_1 y L_2 de un trozo de metal laminado A (ver Figura 7-1). Otro trozo

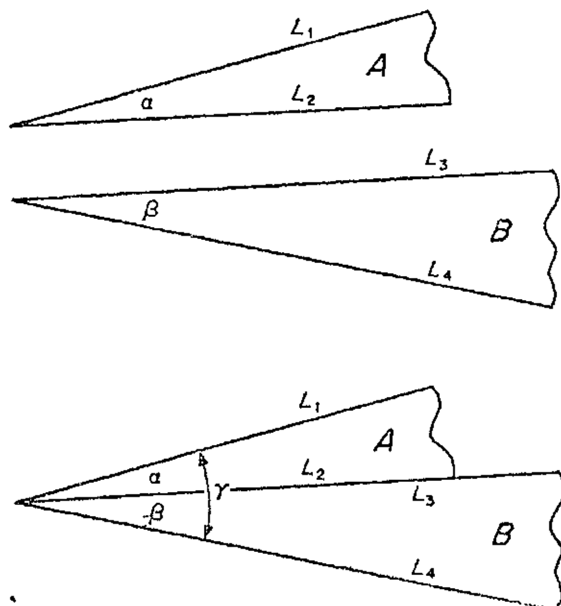


Figura 7-1.

de metal laminado, B, presenta el ángulo β entre los bordes L_3 y L_4. Ahora unimos los dos ángulos colocándolos juntos sobre una mesa de modo que sus vértices coincidan y L_2 de A coincida con L_3 de B. El ángulo γ entre L_1 y L_4 es evidentemente el resultado de unir los ángulos α y β. Podemos decir, pues, que cuando se unen ángulos de esta

manera y se los mide en la forma habitual, sus valores son aditivos. El ángulo γ tiene un valor que es la suma de los valores de α y β. Pero sus valores no son aditivos si la magnitud es una de las funciones trigonométricas, por ejemplo, el seno de cada ángulo. Si lo deseamos, podemos llamar extensa a la magnitud seno (porque disponemos de una operación de unión), pero no aditiva. Por otra parte, podemos decidir no llamar extenso al seno porque la operación de unión en realidad no une los senos. Une los ángulos, pero esto no es lo mismo que poner juntos los senos. Desde este segundo punto de vista, el seno no es extenso.

El criterio que hemos sugerido para decidir si una magnitud es o no extensa no es exacto, según vemos. Como se recordará, dijimos que si podemos concebir una operación que nos *parezca* una operación natural de unión, con respecto a la magnitud dada, entonces llamamos extensa a esta operación. Alguien puede decir que, para él, la operación de colocar dos ángulos juntos lado a lado es una manera totalmente natural de unir senos. Para él, pues, el seno es una magnitud extensa-no aditiva. Alguna otra persona podría decir que es una operación muy buena para unir ángulos, pero no para unir senos. Para esta persona el seno no es extenso. En otras palabras, hay casos límite en los cuales llamar a una magnitud extensa o no es una cuestión subjetiva. Puesto que estos casos de magnitudes extensas pero no aditivas son relativamente raros y hasta discutibles (porque podemos no aceptar la operación propuesta como una legítima operación de unión), es muy comprensible que muchos autores usen los términos "extenso" y "aditivo" como sinónimos. No es necesario criticar tal uso. Para esos autores, "extenso" se aplica a una magnitud sólo si hay una operación de unión con respecto a la cual es válido el principio de aditividad, como es válido para la longitud el peso y muchas otras de las magnitudes comunes de la física.

Debemos hacer ahora algunas observaciones acerca de la

medición de intervalos temporales y longitudes espaciales, porque en cierto sentido estas dos magnitudes son básicas en la física. Una vez que podemos medirlas es posible definir muchas otras magnitudes. Puede no ser posible definir explícitamente esas otras magnitudes, pero al menos se las puede introducir mediante reglas operativas que utilicen los conceptos de distancia o de tiempo. Se recordará, por ejemplo, que en las reglas para medir la temperatura utilizamos el concepto de volumen del mercurio y de la longitud de una columna de mercurio en un tubo. En este caso, presuponíamos que ya sabíamos medir la longitud. En la medición de muchas otras magnitudes de la física se hace una referencia similar a las mediciones de longitud espacial y duración temporal. En este sentido, la longitud y la duración pueden ser consideradas como magnitudes primarias. En los Capítulos VIII y IX examinaremos los procedimientos mediante los cuales se mide el tiempo y el espacio.

VIII

EL TIEMPO

¿Qué tipo de operación de unión puede utilizarse para combinar intervalos de tiempo? Nos enfrentamos inmediatamente con una grave dificultad. No podemos manipular intervalos de tiempo de la misma manera que podemos manipular intervalos espaciales, o, más exactamente, bordes de cuerpos sólidos que representan intervalos espaciales. No hay bordes sólidos de tiempo que puedan ser juntados para formar una línea recta.

Consideremos estos dos intervalos: la duración de cierta guerra desde que se dispara el primer tiro hasta el último y la duración de una tormenta de truenos desde el primer trueno hasta el último. ¿Cómo podemos unir estas dos duraciones? Tenemos dos sucesos separados, cada uno de los cuales tiene una cierta duración, pero no hay manera de juntarlos. Por supuesto, si dos sucesos ya están juntos en el tiempo, podemos reconocer este hecho, pero no podemos trasladar sucesos como podemos trasladar los bordes de objetos físicos.

Lo más que podemos hacer es representar los dos intervalos de tiempo en una escala conceptual. Supongamos que tenemos un suceso *a* que va desde el punto temporal *A* hasta el punto temporal *B*, y un segundo suceso *b* que va desde el punto temporal *B* hasta el punto temporal *C* (ver la Figura 8-1). El punto inicial de *b* es el mismo que el punto terminal de *a*, de modo que los dos sucesos son adyacentes en el tiempo. No los ponemos en esta posición, sino que se producen de esta manera. La longitud de tiempo que hay desde el punto *A* hasta el punto *C* puede ser

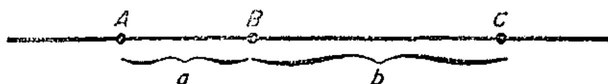


Figura 8-1.

considerada ahora como el resultado de combinar a y b, no de la manera física de combinar las longitudes, sino de una manera conceptual, esto es por la manera de considerar esta situación. La operación conceptual, que simbolizaremos por "o", nos permite formular la siguiente regla de aditividad para la medición de la longitud temporal T:

$$T(a \circ b) = T(a) + T(b)$$

En otras palabras si tenemos dos sucesos, uno de los cuales comienza exactamente cuando el otro termina, entonces, la longitud temporal del suceso total será la suma aritmética de las longitudes temporales de los dos sucesos. Esta regla no es tan poderosa como la regla de aditividad para longitudes espaciales porque sólo podemos aplicarla a sucesos que son adyacentes en el tiempo, y no a cualquier par de sucesos. Luego, después de elaborar un esquema de tres reglas para medir el tiempo, podremos medir las longitudes combinadas no adyacentes. Ahora sólo buscamos una operación de unión que nos suministre la base para establecer una regla de aditividad. Hallamos esta operación en la producción de sucesos adyacentes en el tiempo.

Para completar nuestro esquema, necesitamos dos reglas más: una regla de igualdad y una regla que defina una unidad. Ambas reglas se basan, habitualmente, en algún tipo de proceso periódico: la oscilación de un péndulo, la rotación de la tierra, etc. Todo reloj es simplemente un instrumento para originar un proceso periódico. En algunos relojes, esta tarea la realiza un péndulo, en otros una rueda catalina. El reloj de sol mide el tiempo mediante

el movimiento periódico del Sol a través del cielo. Durante miles de años los científicos basaron sus unidades de tiempo sobre la longitud del día, esto es, sobre la rotación periódica de la Tierra. Pero, debido a que la velocidad de rotación de la Tierra está cambiando levemente, en 1956 se llegó a un acuerdo internacional para basar las unidades de tiempo en el movimiento periódico de la Tierra alrededor del Sol en un año particular. El segundo fue definido como la 1/31.556.925,9747 parte del año 1900. Se abandonó esta unidad en 1964 para obtener una precisión mayor basando el segundo en la vibración periódica del átomo de cesio. Es necesario comprender plenamente este concepto de "periodicidad", esencial en la definición de unidades de tiempo, antes de pasar a examinar cómo puede basarse en él una regla de igualdad y una regla para el establecimiento de unidades.

Primero, debemos distinguir claramente los dos significados de "periodicidad", uno débil y otro fuerte. En el sentido débil, un proceso es periódico simplemente si se repite una y otra vez. El latido del pulso es periódico. La oscilación de un péndulo es periódica. Pero, en el sentido débil, también la salida del Sr. Pérez de su casa es periódica. Se produce una y otra vez, cientos de veces, durante toda la vida del Sr. Pérez. Evidentemente, pues, es periódica en el sentido débil de que es repetida. A veces, *periódico* significa que un ciclo total de fases diferentes se repite en el mismo orden cíclico. Un péndulo, por ejemplo, oscila desde su punto inferior hasta su punto más alto a la derecha, vuelve al punto inferior, llega hasta el punto superior de la izquierda y vuelve al punto inferior; luego se repite todo el ciclo. No se repite un suceso sino una secuencia de sucesos. Pero no es necesario que suceda esto para llamar *periódico* a un proceso. Es suficiente que una fase del proceso continúe repitiéndose. Tal proceso es periódico en el sentido débil.

Pero frecuentemente, cuando alguien dice que un pro-

ceso es periódico, lo dice en un sentido mucho más fuerte: que, además de ser periódico en el sentido débil, los intervalos entre hechos sucesivos de una cierta fase son iguales. Con respecto a las salidas del Sr. Pérez de su casa, esta condición, obviamente, no se cumple. Algunos días puede permanecer en su casa muchas horas. Otros, puede abandonar la casa varias veces en una hora. En cambio, los movimientos de la rueda catalina de un reloj bien construido son periódicos en el sentido fuerte. Evidentemente, hay enorme diferencia entre los tipos de periodicidad.

¿Qué tipo de periodicidad debe tomarse como base para medir el tiempo? Al principio, nos inclinamos a responder que, obviamente, debemos elegir un proceso que sea periódico en el sentido fuerte. No podemos basar la medición del tiempo en la salida del Sr. Pérez de su casa porque es demasiado irregular. Tampoco podemos basarla en el pulso, aunque el pulso se acerca más a la periodicidad en el sentido fuerte que la salida del Sr. Pérez, porque no es aún suficientemente regular. Si se ha corrido mucho o si se tiene fiebre elevada, el pulso late mucho más rápidamente que en otros momentos. Necesitamos un proceso que sea periódico en el más fuerte sentido posible.

Pero hay algo erróneo en este razonamiento. No podemos saber si un proceso es o no periódico en el sentido fuerte a menos que dispongamos ya de un método para determinar intervalos de tiempo iguales. Es precisamente tal método el que tratamos de establecer mediante nuestras reglas. ¿Cómo podemos escapar de este círculo vicioso? Sólo podemos escapar de él renunciando totalmente al requisito de periodicidad en el sentido fuerte. Nos vemos obligados a abandonarlo porque aún no tenemos una base para identificarlo. Nos encontramos en la situación de un físico primitivo que aborda el problema de la medición del tiempo sin disponer siquiera de la ventaja de las nociones precientíficas de intervalos de tiempo iguales. Al no tener ninguna base para la medición del tiempo, busca un proceso periódico

observable de la naturaleza que le suministre tal base. Puesto que no tiene manera de medir intervalos de tiempo, tampoco tiene manera de descubrir si un proceso particular es o no periódico en el sentido fuerte.

Esto es lo que debemos hacer. *Primero*, hallar un proceso que sea periódico en el sentido débil (puede ser también periódico en el sentido fuerte, pero esto es algo que todavía no lo podemos saber). Luego tomamos como operación de unión dos intervalos de tiempo que sean consecutivos en el sentido de que uno comience justamente cuando el otro termina, y afirmamos, como regla de aditividad, que la longitud del intervalo total es la suma aritmética de las longitudes de los dos intervalos componentes. Entonces podemos aplicar esta regla al proceso periódico elegido.

Para completar nuestro esquema, debemos hallar reglas para la igualdad y para la determinación de la unidad. La duración de uno cualquiera de los períodos de los procesos elegidos puede servir como unidad de tiempo. En la Figura 8-2, estos períodos están representados por las longitudes

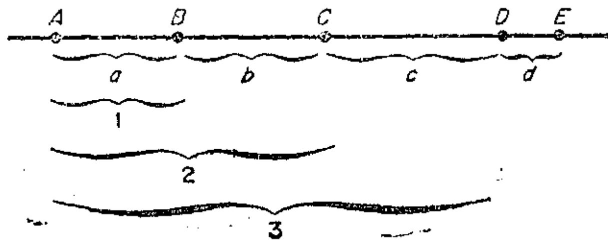


Figura 8-2.

a, *b*, *c*, *d*... entre los puntos temporales *A*, *B*, *C*, *D*, *E*... Decimos que cada uno de estos segmentos tiene una longitud de una unidad. Alguien podría objetar: "Pero el período *b* es mucho más largo que el período *a*." Respondemos: "No sabemos qué quiere usted decir con 'más largo'.

Estamos tratando de establecer reglas para la medición del tiempo de modo que podamos dar significado a la expresión 'más largo'."

Ahora que hemos especificado nuestra unidad (que es simplemente la longitud de cada período del proceso elegido), nuestra regla aditiva nos ofrece una base para medir longitudes de tiempo. Esta regla nos dice que el intervalo de tiempo entre el punto *A* y el punto *C* es 2, entre el punto *A* y el punto *D* es 3, etc. Ahora podemos medir cualquier intervalo de tiempo, aunque basemos nuestro procedimiento en un proceso débilmente periódico. Simplemente contamos el número de veces que nuestro período unidad se repite mientras se produce el suceso que queremos medir. Este número será la longitud del suceso. Esta regla para la igualdad es obvia. Afirma que dos intervalos de tiempo (que pueden estar muy separados en el tiempo) son iguales si ambos contienen el mismo número de períodos elementales del proceso periódico. Esto completa nuestro esquema de tres reglas. Tenemos una regla para la igualdad, otra para la aditividad y otra para la unidad. Sobre la base de este esquema, disponemos de un método para medir el tiempo.

Quizá se presenten algunas objeciones. ¿Es posible, realmente, basar un esquema semejante en cualquier proceso débilmente periódico? Por ejemplo, ¿se lo puede basar en las salidas del señor Pérez de su casa? La respuesta sorprendente es que sí, aunque, como explicaré en seguida, las leyes de la física son mucho más simples si elegimos otros procesos. El punto importante que es necesario comprender ahora es que, una vez establecido un esquema para medir el tiempo, aunque se base en un proceso tan irregular como las salidas del señor Pérez, disponemos de un medio para determinar si un proceso periódico es o no equivalente a otro.

Supongamos que hemos adoptado como base para medir el tiempo el proceso periódico *P*. Ahora podemos comparar

a P con otro proceso débilmente periódico P' para ver si son "equivalentes ". Supongamos, por ejemplo, que P, el proceso periódico, que hemos elegido es la oscilación de un cierto péndulo corto. Deseamos compararlo con P', la oscilación de un péndulo más largo. Considerando que los períodos de los dos péndulos no son iguales, ¿cómo los comparamos? Lo hacemos contando las oscilaciones de ambos péndulos durante un intervalo de tiempo más largo. Podemos descubrir que diez oscilaciones del péndulo corto coinciden con seis oscilaciones del péndulo largo. Esto sucede todas las veces que repetimos la prueba. Aún no estamos en condiciones de trabajar con fracciones de períodos, de modo que debemos realizar nuestra comparación en términos de números enteros de oscilaciones. Pero podemos observar que la coincidencia no es exacta. Después de diez oscilaciones del péndulo corto, el largo ya ha comenzado su séptima oscilación. Refinamos nuestra comparación tomando un intervalo de tiempo más largo, por ejemplo, cien períodos del péndulo corto. Cada vez que realizamos la prueba, observamos que durante este intervalo el péndulo largo completa sesenta y dos períodos. De esta manera, podemos afinar nuestra comparación todo lo que nos plazca. Si hallamos que un cierto número de períodos del proceso P siempre coinciden con un cierto número de períodos del proceso P', decimos que las dos periodicidades son equivalentes.

Es un hecho de la naturaleza el que exista una clase muy grande de procesos periódicos que sean equivalentes entre sí, en este sentido. No es algo que podamos saberlo *a priori*. Lo descubrimos observando el mundo. No podemos decir que estos procesos equivalentes son periódicos en el sentido fuerte, pero podemos comparar dos cualesquiera de ellos y hallar que son equivalentes. Todos los péndulos oscilantes pertenecen a esta clase, al igual que los movimientos de las ruedas catalinas de los relojes, el movimiento aparente del Sol a través del cielo, etc. Hallamos en la naturaleza una clase enorme de procesos tales que dos cualesquiera

de ellos resultan equivalentes cuando los comparamos de la manera explicada en el párrafo anterior. En la medida de nuestro conocimiento, hay solamente *una* gran clase de esta especie.

¿Qué sucede si decidimos basar nuestra escala de tiempo en un proceso periódico que no pertenezca a esta gran clase de procesos equivalentes, como el latido de un pulso? Los resultados serán algo extraños, pero queremos destacar que la elección del latido de un pulso como base para la medición del tiempo no conduce a ninguna contradicción lógica. No hay ningún sentido en el cual sea "falso" medir el tiempo sobre esta base.

Imaginemos que estamos viviendo en una fase muy primitiva del desarrollo de los conceptos relativos a la medición. No poseemos ningún instrumento para medir el tiempo, como un reloj, de modo que no tenemos manera de determinar si nuestro pulso puede variar en diferentes circunstancias fisiológicas. Estamos tratando, por primera vez, de elaborar reglas operativas para la medición del tiempo y decidimos usar el latido de mi pulso como base de la medición.

Tan pronto como comparamos el latido de mi pulso con otros procesos periódicos de la naturaleza, encontramos toda clase de procesos que quizás habríamos considerado uniformes, pero que resultan no serlo. Por ejemplo, descubrimos que el Sol necesita tantos y tantos latidos de mi pulso para atravesar el cielo los días en los que yo me siento bien. Pero los días en los cuales tengo fiebre, el Sol necesita muchos más para efectuar su viaje. Consideramos extraño este hecho, pero no hay nada lógicamente contradictorio en nuestra descripción de la totalidad del mundo sobre esta base. No podemos decir que el péndulo es la elección "correcta" como base de nuestra unidad de tiempo y el latido de mi pulso la elección "incorrecta". En esto no hay nada correcto o incorrecto porque en ninguno de los casos aparece una contradicción lógica. Es simplemente una elección

entre una descripción simple y una descripción compleja del mundo.

Si basamos el tiempo sobre mi pulso, tendremos que afirmar que los procesos periódicos de toda suerte, en la naturaleza, tienen intervalos de tiempo que varían según lo que yo haga o cómo me sienta. Si corro velozmente durante un momento y luego me detengo y mido estos procesos naturales por medio de mi pulso, hallo que, mientras estoy corriendo y durante algunos instantes después, las cosas del mundo se retardan. Después de algunos minutos, vuelven a la normalidad. Debe recordarse nuestra suposición de que estamos en una época anterior a la adquisición de conocimiento alguno acerca de las leyes de la naturaleza. No tenemos textos de física que nos digan que tal o cual proceso es uniforme. En nuestro primitivo sistema físico, la revolución de la Tierra, las oscilaciones de los péndulos, etc., son muy irregulares. Tienen una velocidad cuando yo estoy bien, y otra cuando tengo fiebre.

Así, podemos hacer una genuina elección. No es una elección entre un procedimiento de medida correcto y otro incorrecto, sino una elección basada en la simplicidad. Observamos que si elegimos el péndulo como base del tiempo, el sistema resultante de leyes físicas será enormemente más simple que si elegimos los latidos de mi pulso. Es bastante complicado si usamos mi pulso, pero, por supuesto, sería mucho peor si eligiéramos las salidas del señor Pérez de su casa, a menos que nuestro Sr. Pérez fuera Immanuel Kant, de quien se dice que salía todas las mañanas de su casa exactamente a la misma hora, hasta el punto de que los miembros de la comunidad ponían en hora sus relojes al verlo aparecer por la calle. Pero los movimientos de un mortal corriente no serían una base adecuada para la medición del tiempo.

Por "adecuada" quiero significar, por supuesto, conveniente, en el sentido de que conduce a leyes simples. Cuando basamos nuestra medición del tiempo en la oscilación de un

péndulo, hallamos que todo el universo se comporta con gran regularidad y es posible describirlo mediante leyes de gran simplicidad. El lector quizás no haya considerado simples a esas leyes cuando estudió física, pero son simples en el sentido relativo de que serían mucho más complicadas si adoptáramos como unidad de tiempo el latido de mi pulso. Los físicos constantemente expresan su sorpresa ante la simplicidad de nuevas leyes. Cuando Einstein descubrió su principio general de relatividad, manifestó su asombro ante el hecho de que un principio relativamente tan simple gobernase todos los fenómenos a los cuales se lo aplicaba. Esta simplicidad desaparecería si basáramos nuestro sistema para la medición del tiempo en un proceso que no perteneciera a la gran clase de procesos equivalentes.

El latido de mi pulso, en cambio, pertenece a una clase sumamente pequeña de procesos equivalentes. Los otros miembros de esta clase probablemente son procesos de mi propio cuerpo que están vinculados fisiológicamente con el latido del corazón. El pulso de mi muñeca izquierda es equivalente al pulso de mi muñeca derecha. Pero aparte de los procesos que se relacionan con mi corazón, sería difícil hallar otros procesos de la naturaleza con los cuales mi pulso fuera equivalente. Así, tenemos aquí una clase muy pequeña de procesos equivalentes, en comparación con la vastísima clase que contiene a los movimientos de los planetas, las oscilaciones de los péndulos, etc. Por esta razón, es aconsejable elegir como base para la medición del tiempo un proceso de esta gran clase.

No interesa mucho cuál miembro de esta clase elijamos, ya que aún no nos preocupa obtener una gran precisión en las mediciones. Una vez que hacemos nuestra elección, podemos decir que el proceso elegido es periódico en el sentido fuerte. Esto, claro está, es simplemente una cuestión de definición. Pero ahora los otros procesos equivalentes a él son periódicos en el sentido fuerte de una manera que ya no es trivial, que no es el resultado de una definición. Reali-

zamos ensayos empíricos y descubrimos mediante la observación que son fuertemente periódicos en el sentido de que presentan una gran uniformidad en sus intervalos de tiempo. Como resultado de esto, estamos en condiciones de describir los procesos de la naturaleza de una manera relativamente simple. Este punto es tan importante que lo destacaré repitiéndolo muchas veces. Nuestra elección de un proceso como base para la medición del tiempo no es algo de lo que pueda decirse que es correcto o incorrecto. Cualquier elección es lógicamente posible. Cualquier elección conducirá a un conjunto consistente de leyes naturales. Pero si basamos nuestra medición del tiempo en procesos tales como la oscilación de un péndulo, descubrimos que conduce a una física mucho más simple que si usáramos otros procesos.

Históricamente, nuestra sensación fisiológica del tiempo, nuestra impresión intuitiva de regularidad intervino, sin duda, en las primeras elecciones de los procesos sobre los cuales iba a basarse la medición del tiempo. El Sol parece salir y ponerse con regularidad, por lo cual los relojes de sol fueron una manera conveniente de medir el tiempo: mucho más conveniente, por ejemplo, que los movimientos de las nubes. De manera análoga, las culturas primitivas consideraron conveniente basar los relojes en el tiempo de escurrimiento de la arena o del agua o de otros procesos que eran aproximadamente equivalentes al movimiento del Sol. Pero el aspecto básico sigue siendo el siguiente: la elección se inspira en la conveniencia y la simplicidad.

IX

LA LONGITUD

Pasemos ahora del concepto de tiempo al otro concepto básico de la física, el de longitud, y examinémoslo más minuciosamente que antes. El lector recordará que en el Capítulo VII vimos que la longitud es una magnitud extensa, medible por medio de un esquema triple. La Regla 1 define la igualdad: un segmento marcado sobre un borde recto tiene igual longitud que otro segmento marcado sobre otro borde recto si los puntos extremos de los dos segmentos coinciden. La Regla 2 define la aditividad: si juntamos dos bordes en línea recta, su longitud total será la suma de sus longitudes separadas. La Regla 3 define la unidad: tomamos una vara con un borde recto, marcamos dos puntos sobre este borde y elegimos el segmento determinado por estos dos puntos como unidad de longitud.

Sobre la base de estas tres reglas podemos aplicar el procedimiento habitual para la medición. Supongamos que queremos medir la longitud de un largo borde c, por ejemplo el borde de una hendidura. Tenemos una vara de medir sobre la cual está marcada nuestra unidad de longitud a por sus puntos extremos A y B. Colocamos la vara a lo largo de c, en la posición a_1 (ver Fig. 9-1), de modo que A coincida con un extremo C_0 de c. Sobre el borde c marcamos el punto C_1 que coincide con el extremo B de nuestra vara. Luego, trasladamos la vara a a la posición adyacente a_2 y marcamos el punto C_2 sobre c, y así sucesivamente hasta llegar al otro extremo de c. Supongamos que la décima posición a_{10} de la vara es tal que su extremo B coincide aproximadamente con el extremo C_{10} de c. Sean c_1, c_2,

Figura 9-1.

..., c_{10} los segmentos marcados en c. Por la Regla 3, tenemos:

$$L(a) = L(a_1) = L(a_2) = \ldots = L(a_{10}) = 1.$$

Luego, por la Regla 1:

$$L(c_1) = 1, L(c_2) = 1, \ldots\ L(c_{10}) = 1.$$

Por la Regla 2:

$$L(c_1 \circ c_2) = 2, L(c_1 \circ c_2 \circ c_3) = 3 \ldots$$

Por lo tanto:

$$L(c) = L(c_1 \circ c_2 \circ \ldots \circ c_{10}) = 10.$$

Este procedimiento, el procedimiento básico para medir longitudes, sólo da números enteros como valores de las longitudes medidas. El refinamiento obvio del mismo se logra dividiendo la unidad de longitud en n partes iguales. (La pulgada se divide tradicionalmente de manera binaria: primero en dos partes, luego en cuatro, luego en ocho, etc. El metro se divide en forma decimal: primero en diez partes, luego en cien, etc.) De esta manera, podemos construir, por

ensayo y error, una vara de medir auxiliar con un segmento marcado de longitud d, tal que d pueda ser colocado en n posiciones adyacentes, d_1, d_2, ..., d_n, a lo largo del borde unidad a (ver Fig. 9-2). Ahora podemos decir que:

$$n \times L(d) = L(a) = 1$$

Por lo tanto:

$$L(d) = \frac{1}{n}$$

Una vez marcados sobre a estos segmentos parciales, podemos medir con mayor precisión la longitud de un borde dado. Cuando volvemos a medir la longitud de la hendidura c del ejemplo anterior, la misma puede resultar ahora, no 10, sino más exactamente 10,2. De esta manera se introducen las fracciones en las mediciones. Ya no estamos limitados a los enteros. Un valor medido puede ser cualquier número racional positivo.

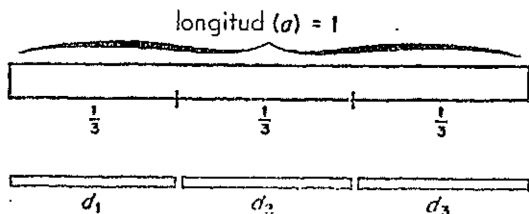


Figura 9-2.

Es importante comprender que, al introducir estos refinamientos en la medición, podemos introducir fracciones cada vez más pequeñas, pero nunca podemos llegar a números que no sean racionales. Por otra parte, la clase de los valores posibles de una magnitud habitualmente es considerada, en la física, como una clase que contiene a todos los

números reales (o a todos los números reales de un intervalo especificado), es decir, que incluye tanto a los números irracionales como a los racionales. Pero los números irracionales son introducidos en una etapa posterior a la de la medición. La medición directa sólo puede brindar valores expresables en números racionales. Pero cuando formulamos leyes y hacemos cálculos con ayuda de estas leyes, los números irracionales entran en consideración. Se los introduce en un contexto teórico, no en el contexto de la medición directa.

Para aclarar lo anterior, consideraremos el teorema de Pitágoras, según el cual el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados. Se trata de un teorema de la geometría matemática, pero, cuando lo aplicamos a segmentos físicos, se convierte también en una ley física. Supongamos que en una tabla de madera cortamos un cuadrado de lado igual a la unidad de longitud. El teorema de Pitágoras nos dice que la longitud de la diagonal de este cuadrado (ver Fig. 9-3) es igual a la raíz cuadrada de 2. La raíz cuadrada de 2 es un número irracional. Hablando estrictamente, no se la puede medir con una regla basada en nuestra unidad

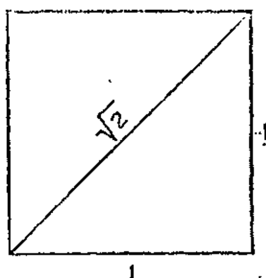


Figura 9-3.

de medida, por pequeñas que sean las subdivisiones fraccionarias. Pero cuando calculamos la longitud de la diagonal

utilizando el teorema de Pitágoras, obtenemos, indirectamente, un número irracional. Análogamente, si medimos el diámetro de un disco circular de madera y hallamos que es 1, al calcular la longitud del perímetro del disco llegamos al número irracional pi.

Puesto que los números irracionales son siempre el resultado de cálculos y nunca el de una medición directa, ¿no sería posible abandonar totalmente en la física los números irracionales y trabajar solamente con los racionales? Ciertamente, esto es posible, pero sería un cambio revolucionario. Por ejemplo, ya no podríamos trabajar con ecuaciones diferenciales, pues tales ecuaciones requieren el continuo de números reales. Los físicos aún no han encontrado razones suficientemente importantes para introducir tal cambio. Es cierto que en la física cuántica apunta una tendencia a la utilización de magnitudes discretas. La carga eléctrica, por ejemplo, sólo se mide en cantidades que son múltiplos de una carga eléctrica mínima. Si tomamos esta carga mínima como unidad, todos los valores de cargas eléctricas son números enteros. La mecánica cuántica aún no se basa totalmente en magnitudes discretas, pero hay una parte tan grande de ella que es discreta que algunos físicos han comenzado a especular acerca de la posibilidad de que todas las magnitudes físicas, inclusive las de espacio y tiempo, sean discretas. Pero se trata solamente de una especulación, aunque sumamente interesante.

¿Qué tipo de leyes sería posible elaborar en una física semejante? Probablemente, habría un valor mínimo para cada magnitud, y todos los valores mayores se expresarían como múltiplos de este valor básico. Se ha sugerido llamar un "hodón" al valor mínimo de la longitud, y un "cronón" al valor mínimo del tiempo. El tiempo discreto consistiría en saltos inconcebiblemente pequeños, como el movimiento de la manecilla de un reloj eléctrico cuando salta de un segundo al siguiente. En los intervalos entre los saltos no podría producirse ningún suceso físico.

El espacio discreto consistiría en puntos del tipo que se muestra en la Figura 9-4. Las líneas del diagrama indican cuáles son los "puntos vecinos" (por ejemplo, *B* y *C* son vecinos, pero *B* y *F* no lo son). En la geometría común de la continuidad, diríamos que entre *B* y *C* hay una infinidad

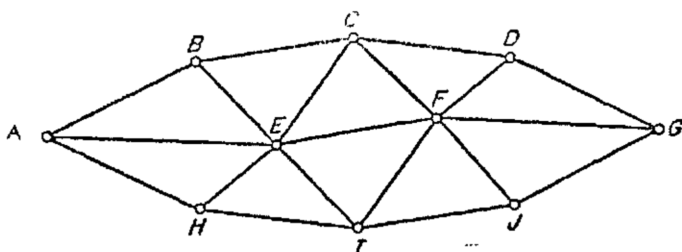


Figura 9-4.

de puntos, pero en la geometría discreta, si la física adoptara esta concepción del espacio, deberíamos decir que *no* hay puntos intermedios entre *B* y *C*. Ningún fenómeno físico, de ninguna especie, podría tener una posición situada "entre" *B* y *C*. Un electrón, por ejemplo, tendría que estar en uno de los puntos de la red, y no podría estar nunca en ninguna otra parte del diagrama. La longitud sería definida como la longitud mínima de un camino que conecta dos puntos. Podríamos estipular que la distancia entre dos puntos vecinos cualesquiera es 1. Luego, la longitud del camino *ABCDG* sería 4 y el de *AEFG* sería 3. Diríamos que la distancia de *A* a *G* es 3, porque es la longitud del camino más corto entre *A* y *G*. Toda longitud estaría expresada mediante un número entero. No se ha construido ningún sistema real de esta especie para la física, aunque se han presentado muchas sugestivas propuestas. Algunos físicos hasta han especulado acerca del tamaño de estas magnitudes mínimas.

En algún tiempo futuro, cuando se sepa mucho más acer-

ca del espacio, del tiempo y de las otras magnitudes de la física, quizás se descubra que todas ellas son discretas. Las leyes de la física sólo tendrían que habérselas con números enteros. Serían, por supuesto, números enormes. En cada milímetro de longitud, por ejemplo, habría miles de millones de la unidad mínima. Los valores que adoptaría una magnitud serían tan cercanos unos a otros que, en la práctica, procederíamos como si se tratara de un continuo de números reales. Los físicos probablemente continuarían utilizando el cálculo infinitesinal y formulando leyes en forma de ecuaciones diferenciales, como antes. Todo lo que podemos decir por ahora es que, con la adopción de escalas discretas, algunos aspectos de la física se simplificarían mientras que otros se harían más complicados. Nuestras observaciones nunca nos permiten decidir si un valor debe ser expresado como un número racional o como un número irracional, de modo que ésta es una cuestión de conveniencia: ¿la manera más útil de formular ciertas leyes físicas será una escala discreta o una continua?

En nuestra descripción de la medición de longitudes aún no hemos considerado una cuestión sumamente importante: ¿qué tipo de cuerpo adoptaremos como vara de medida patrón? Para los propósitos corrientes, bastaría adoptar una vara de hierro o hasta una vara de madera, porque no sería necesario medir longitudes con gran precisión. Pero si buscamos mayor exactitud, vemos inmediatamente que nos enfrentamos con una dificultad similar a la que se nos presentó con respecto a la periodicidad.

Como se recordará, se nos planteó el problema evidente de basar nuestra unidad de tiempo en un proceso periódico de períodos iguales. En el caso presente se nos plantea el problema análogo de basar nuestra unidad de longitud en un "cuerpo rígido". Nos inclinamos a pensar que necesitamos un cuerpo que mantenga siempre exactamente la misma longitud, así como antes necesitábamos un proceso periódico cuyos intervalos de tiempo fueran siempre los mismos.

Obviamente, pensamos, no queremos basar nuestra unidad de longitud en una vara de goma o de cera, que se deforme fácilmente. Supongamos que necesitamos una vara rígida, cuya forma o tamaño no se altere. Quizás definamos la "rigidez" de esta manera: una vara es rígida si la distancia entre dos puntos cualesquiera marcados sobre la misma permanece constante en el curso del tiempo.

Pero, ¿qué queremos decir exactamente por "permanecer constante"? Para explicarlo, tendríamos que introducir el concepto de longitud. A menos que dispongamos de un concepto de longitud y de un medio de medirla, ¿qué significaría decir que la distancia entre dos puntos de una vara, de hecho, permanece constante? Y si no podemos determinar esto, ¿cómo podemos definir la rigidez? Así, estamos atrapados en el mismo tipo de círculo vicioso en el cual nos encontramos cuando buscábamos la manera de identificar un proceso fuertemente periódico antes de elaborar un sistema para la medición del tiempo. Nuevamente, ¿cómo escaparemos de este círculo vicioso?

La salida es similar a aquella por la cual escapamos del círculo vicioso en la medición del tiempo: el uso de un concepto relativo en lugar de uno absoluto. Podemos, sin caer en un círculo vicioso, definir un concepto de "rigidez relativa" de un cuerpo con respecto a otro. Tomemos un cuerpo *M*, y otro *M'*. Para simplificar, supongamos que ambos tienen un borde recto. Podemos colocar los bordes juntos y comparar los puntos marcados en ellos (ver Fig. 9-5).

Consideremos un par de puntos *A* y *B* de *M* que determinan el segmento *a*. Análogamente en *M'* un par de puntos *A'* y *B'* determinan el segmento *a'*. Decimos que el segmento *a* es congruente con el segmento *a'* si, cuando se juntan los dos bordes de modo que el punto *A* coincida con el punto *A'*, el punto *B* coincide con *B'*. Este es nuestro procedimiento operativo para decidir que los segmentos *a* y *a'* son congruentes. Hallamos que, toda vez que efectuamos esta prueba, el par de puntos coincide, por lo cual concluimos que

si repetimos el experimento en cualquier instante futuro, el resultado probablemente será el mismo. Además, supongamos que se observe que *todo* segmento marcado de esta

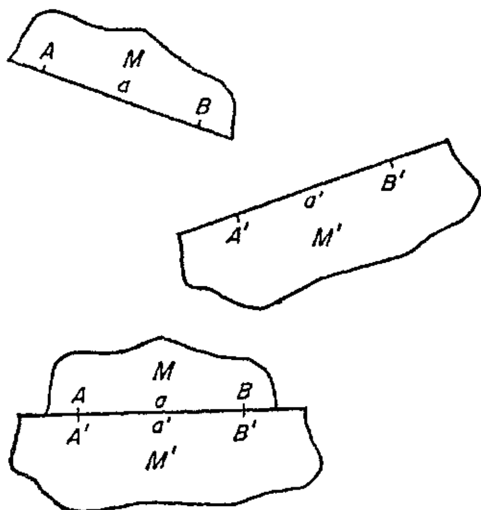


Figura 9-5.

manera en *M* es congruente, toda vez que se hace una prueba, con el segmento correspondiente marcado en *M'*. Decimos entonces que *M* y *M'* son *rígidos uno con respecto al otro.*

Es importante comprender que aquí no hay ningún círculo vicioso. No podemos hablar ni hablamos de la rigidez absoluta de *M*; no podemos decir que la longitud de *M* permanece siempre constante. Pero tiene sentido decir que los dos cuerpos son rígidos *uno con respecto al otro.* Si elegimos a *M* como vara de medir hallamos que los segmentos marcados en *M'* mantienen constante su longitud. Si elegimos *M'* como vara de medir, los segmentos de *M* permanecen

constantes. Tenemos aquí un concepto de rigidez relativa, la rigidez de un cuerpo con respecto al otro.

Cuando examinamos los diversos cuerpos del mundo, encontramos muchos que no son rígidos unos con respecto a otros. Tomemos mis dos manos, por ejemplo. Las coloco juntas de modo que ciertos pares de puntos de los extremos de mis dedos coincidan. Las coloco juntas nuevamente. Las posiciones de mis dedos han cambiado. Los mismos pares de puntos ya no son congruentes, de modo que no puedo decir que mis manos han permanecido rígidas una con respecto a la otra. Lo mismo sucede si comparamos dos cuerpos hechos de cera o uno de hierro y otro de goma blanda. No son rígidos uno con respecto al otro. Pero, así como hallamos que el mundo contiene una clase muy grande de procesos que son equivalentes en su periodicidad, así también encontramos otra afortunada circunstancia accidental de la naturaleza. Descubrimos empíricamente que hay una clase muy amplia de cuerpos que son aproximadamente rígidos unos con respecto a otros. Dos cuerpos de metal –hierro, cobre, etc.– son rígidos uno con respecto al otro; lo mismo la piedra y hasta la madera, si está bien seca y ya no es verde. Hallamos que muchas sustancias sólidas son de tal tipo que los cuerpos hechos de esas sustancias son rígidos unos con respecto a otros. Naturalmente que ellos dejan de ser rígidos si los curvamos o hacemos que se dilaten calentándolos, etc. Pero mientras no intervengan circunstancias anormales, estos cuerpos se comportan de una manera sumamente regular en lo que concierne a sus longitudes. Cuando hacemos comparaciones aproximadas de unos con otros, los hallamos relativamente rígidos.

El lector recordará que, en nuestro examen de la periodicidad, vimos que no hay ninguna razón lógica que nos obligue a basar nuestra medición del tiempo en uno de los procesos periódicos pertenecientes a la gran clase de procesos equivalentes. Elegimos tal proceso sólo porque la elección daba como resultado una mayor simplicidad de

nuestras leyes naturales. En el caso presente, es menester realizar una elección similar. No hay ninguna necesidad lógica de basar la medición de la longitud en un miembro de una clase grande de objetos relativamente rígidos. Elegimos tales cuerpos porque es más conveniente. Si optáramos por tomar como unidad de longitud una vara de goma o de cera, hallaríamos muy pocos cuerpos del mundo, o quizás ninguno, que fueran relativamente rígidos de acuerdo con nuestro patrón. Nuestra descripción de la naturaleza, entonces, se complicaría enormemente. Tendríamos que decir, por ejemplo, que los cuerpos de hierro cambian constantemente de longitud, porque cada vez que los medimos con nuestra vara de goma flexible obtenemos un valor diferente. Ningún científico, por supuesto, querría abrumarse con las complejas leyes físicas que sería menester concebir para describir tales fenómenos. Por otra parte, si elegimos una barra metálica como patrón de longitud, hallamos que un número muy grande de cuerpos del mundo son rígidos cuando se los mide con ella. De este modo, se introduce una regularidad y una simplicidad mucho mayores en nuestra descripción del mundo.

Esta regularidad deriva, claro está, de la naturaleza del mundo real. Podríamos vivir en un mundo en el cual los cuerpos de hierro fueran rígidos unos con respecto a otros y los cuerpos de cobre lo fueran entre sí, pero un cuerpo de hierro no fuera rígido con respecto a otro de cobre. En esto no hay ninguna contradicción lógica. Es un mundo posible. Si viviéramos en tal mundo y descubriéramos que contiene una gran cantidad de cobre y de hierro, ¿cómo elegiríamos entre los dos una base adecuada para la medición? Cualquier elección presentaría una desventaja. Si otros metales estuvieran análogamente en desacuerdo, por decirlo así, unos con respecto a otros, nuestras elecciones serían aun más difíciles. Afortunadamente, vivimos en un mundo en el que esto no sucede. Todos los metales son relativamente rígidos entre sí; por lo tanto, podemos adoptar a cualquiera

de ellos como patrón. Al hacerlo, hallamos que otros cuerpos metálicos son rígidos.

Es tan obviamente conveniente basar nuestra medición de la longitud en una vara de metal y no en una vara de goma, así como basar nuestra medición del tiempo en un péndulo y no en el latido de un pulso, que tendemos a olvidar que se trata de componentes convencionales de nuestra elección de un patrón. Es un componente que destaqué en mi tesis de doctorado sobre el espacio [1] y que posteriormente Reichenbach destacó en su libro sobre el espacio y el tiempo. La elección es convencional en el sentido de que no hay ninguna razón lógica que nos impida elegir la vara de goma y el latido del pulso como patrones, y luego pagar el precio de nuestra elección elaborando una física fantásticamente compleja para explicar un mundo de enorme irregularidad. Esto no significa, claro está, que la elección sea arbitraria, que una elección sea tan buena como cualquier otra. Hay razones de carácter práctico —a saber, que el mundo es como es— para preferir la vara de acero y el péndulo.

Una vez que hemos elegido un patrón de medida, como una vara de acero, debemos hacer otra elección. Podemos decir que la longitud de esta vara particular es nuestra unidad, independientemente de los cambios de su temperatura, de su grado de magnetización, etc., o podemos introducir factores de corrección que dependen de tales cambios. La primera elección, obviamente, nos brinda la regla más simple, pero si la adoptamos, debemos afrontar nuevamente extrañas consecuencias. Si se calienta la vara y luego se la usa para medir, hallamos que todos los otros cuerpos del mundo se han contraído. Cuando la vara se enfría, el resto del mundo se dilata nuevamente. Nos veríamos obligados a formular toda suerte de curiosas y complicadas leyes, pero no habría ninguna contradicción lógica. Por esta razón, podemos decir que es una elección posible.

[1] *Der Raum. Ein Beitrag zur Wissenschaftslehre* (Jena: University of Jena, 1921; Berlin: Verlag von Reuther & Reichard, 1922).

El segundo procedimiento consiste en introducir factores de corrección. En lugar de estipular que el segmento entre las dos marcas será considerado siempre como la longitud elegida l_0 (digamos, 1 o 100), decretamos que tiene la longitud normal l_0 sólo cuando la vara está a la temperatura T_0, que elegimos como temperatura "normal", mientras que a cualquier otra temperatura T la longitud del segmento estará dada por la ecuación:

$$l = l_0[1 + \beta(T - T_0)],$$

donde β es una constante (llamada el "coeficiente de dilatación térmica") que es característica de la sustancia de la cual está hecha la vara. Correcciones similares se introducen del mismo modo para otras condiciones, tales como la presencia de campos magnéticos, que también pueden afectar a la longitud de la vara. Los físicos prefieren decididamente este procedimiento más complicado, el de la introducción de factores de corrección, por la misma razón por la cual eligen una vara de metal y no una de goma: porque esa elección conduce a una gran simplificación de las leyes físicas.

X

LAS MAGNITUDES DERIVADAS Y EL LENGUAJE CUANTITATIVO

Cuando se han establecido reglas para la medición de algunas magnitudes como la longitud espacial, la extensión de tiempo y la masa, entonces, sobre la base de estas magnitudes "primitivas" podemos introducir otras magnitudes por definición. Estas magnitudes son llamadas "definidas" o "derivadas". Siempre es posible determinar indirectamente el valor de una magnitud derivada, con ayuda de su definición, a partir de los valores de las magnitudes primitivas que intervienen en la definición.

En algunos casos, sin embargo, es posible construir un instrumento que mida tal magnitud directamente. Por ejemplo, la densidad es considerada comúnmente como una magnitud derivada porque su medición se basa en la medición de las magnitudes primitivas longitud y masa. Medimos directamente el volumen y la masa de un cuerpo, y luego definimos su densidad como el cociente de la masa dividida por el volumen. Pero es posible medir directamente la densidad de un líquido, por medio de un hidrómetro. Habitualmente, éste consiste en un flotador de vidrio con un largo cuello delgado como un termómetro. En el cuello está marcada una escala que indica la profundidad a la cual se sumerge el instrumento en el líquido examinado. La densidad aproximada del líquido se determina directamente mediante la lectura de esta escala. Así, la distinción entre magnitudes primitivas y derivadas no debe considerarse fundamental; es una distinción basada en los procedimientos prácticos de los físicos para efectuar mediciones.

Si un cuerpo no es homogéneo, debemos hablar de una "densidad media". Nos sentimos tentados a decir que la densidad de tal cuerpo, en un punto dado, debe ser expresada como el límite del cociente de la masa dividida por el volumen, pero, como la materia es discreta, no podemos aplicar aquí el concepto de límite. En el caso de otras magnitudes derivadas, es necesario aplicarlo. Por ejemplo, consideremos un cuerpo que se mueve a lo largo de una trayectoria. Durante un intervalo de tiempo de longitud Δt, atraviesa una longitud espacial de Δs. Definimos entonces su "velocidad", otra magnitud derivada, como el cociente $\Delta s/\Delta t$. Pero si la velocidad no es constante, sólo podemos decir que su "velocidad media" durante este intervalo de tiempo fue de $\Delta s/\Delta t$. ¿Cuál fue la velocidad del cuerpo en determinado punto temporal de este intervalo? Esta pregunta no puede ser respondida definiendo la velocidad como un simple cociente entre la distancia y el tiempo. Debemos introducir el concepto de límite del cociente a medida que el intervalo de tiempo se aproxima a cero. En otras palabras, debemos utilizar lo que en el cálculo infinitesimal se llama la derivada. En lugar del cociente simple $\Delta s/\Delta t$, tenemos la derivada:

$$\frac{ds}{dt} = \text{lím} \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{ para } \Delta t \to 0$$

Esta es llamada la "velocidad instantánea" del objeto, porque expresa una velocidad en un punto temporal particular, y no una velocidad promediada a través de un intervalo. Por supuesto, se trata de otro ejemplo de magnitud derivada. Al igual que el concepto de densidad, también se la puede medir directamente por medio de ciertos instrumentos; por ejemplo, el velocímetro de un automóvil suministra una medición directa de la velocidad instantánea del automóvil.

También se utiliza el concepto de límite para definir la

magnitud derivada llamada aceleración. Tenemos una velocidad v y un cambio de esta velocidad, Δv, que se produce de un punto temporal a otro. Si el intervalo de tiempo es Δt y el cambio de velocidad es Δv, la aceleración, o tasa a la cual cambia la velocidad, es $\Delta v / \Delta t$. También en este caso debemos considerar a ésta como la "aceleración media" durante el intervalo temporal Δt. Si queremos ser más precisos y hablar de "aceleración instantánea" en un punto temporal determinado, debemos abandonar el cociente de dos valores finitos y escribir la siguiente derivada:

$$\frac{dv}{dt} = \text{lím} \, \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ para } \Delta t \rightarrow 0$$

La aceleración instantánea, pues, es la segunda derivada de s con respecto a t:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

A veces, un físico puede decir que la densidad en un cierto punto de un cuerpo físico es la derivada de su masa con respecto a su volumen, pero ésta sólo es una manera aproximada de hablar. Su afirmación no puede ser interpretada literalmente, porque, si bien el espacio y el tiempo son continuos (en la física actual), la distribución de la masa en un cuerpo no lo es; al menos, no lo es en el nivel molecular o atómico. Por esta razón, no podemos hablar literalmente de la densidad como una derivada; no es una derivada de la manera como este concepto de límite puede ser aplicado a magnitudes genuinamente continuas.

Hay muchas otras magnitudes derivadas en la física. Para introducirlas, no es necesario establecer reglas complicadas como las examinadas antes para introducir magnitudes primitivas. Sólo tenemos que definir de qué manera es posible calcular la magnitud derivada a partir de los valores

de las magnitudes primitivas, que pueden ser medidas directamente.

En ocasiones se plantea un problema desconcertante en lo que concierne tanto a las magnitudes primitivas como a las derivadas. Para explicarlo con claridad, imaginemos que tenemos dos magnitudes M_1 y M_2. Cuando examinamos la definición de M_1 o las reglas que nos enseñan a medirla, hallamos que interviene la magnitud M_2. Cuando pasamos a la definición o a las reglas referentes a M_2, hallamos que interviene M_1. Al principio, esto da la impresión de que hay un círculo vicioso en los procedimientos, pero es fácil eludir tal círculo aplicando lo que se llama el método de las aproximaciones sucesivas. Se recordará que en un capítulo anterior examinamos la ecuación que define la longitud de una vara de medir. En esta ecuación aparece un factor de corrección para la dilatación térmica; en otras palabras, la temperatura interviene en el conjunto de reglas utilizadas para la medición de la longitud. Por otra parte, el lector recordará que en nuestras reglas para medir la temperatura nos referimos a la longitud, o, más bien, al volumen de cierto líquido de prueba utilizado en el termómetro; pero, por supuesto, el volumen se determina con ayuda de la longitud. Así, pareciera que hay dos magnitudes, la longitud y la temperatura, cada una de las cuales depende de la otra en cuanto a su definición. Parece haber un círculo vicioso; pero, en realidad, no lo hay.

Una solución es la siguiente. Primero, introducimos el concepto de longitud sin considerar el factor de corrección para la dilatación térmica. Este concepto no nos permite realizar mediciones de gran precisión, pero es bastante satisfactorio si no se requiere gran precisión. Por ejemplo, si se usa una vara de hierro para la medición, la dilatación térmica es tan pequeña en condiciones normales que las mediciones serán bastante precisas. De este modo, obtenemos un primer concepto, L_1, de longitud espacial. Ahora podemos utilizar este concepto para la construcción de un termó-

metro. Con ayuda de la vara de hierro, marcamos una escala a lo largo del tubo que contiene el líquido de prueba. Puesto que podemos construir esta escala con bastante precisión, también obtenemos bastante precisión al medir la temperatura con esta escala. De tal modo, introducimos nuestro primer concepto de temperatura, T_1. Luego podemos utilizar T_1 para establecer un concepto refinado de longitud, L_2. Lo hacemos introduciendo T_1 en las reglas para definir la longitud. Disponemos ahora del concepto refinado de longitud, L_2 (corregido para la dilatación térmica de la vara de hierro), para construir una escala más precisa destinada a nuestro termómetro. Esto conduce, claro está, a T_2, un concepto refinado de la temperatura.

En el caso de la longitud y de la temperatura, el procedimiento que acabamos de describir refina ambos conceptos hasta un punto en el cual los errores son sumamente pequeños. En otros casos, puede ser necesario ir y volver varias veces antes de que los sucesivos refinamientos conduzcan a mediciones suficientemente precisas para nuestros propósitos. Debe admitirse que nunca llegamos a un método absolutamente perfecto para medir uno u otro concepto. Pero podemos decir que cuanto más repetimos este procedimiento —comenzando con dos conceptos toscos y luego refinando cada uno de ellos con ayuda del otro— tanto más precisas serán nuestras mediciones. Mediante esta técnica de aproximaciones sucesivas escapamos de lo que parece ser, al principio, un círculo vicioso.

Abordaremos ahora una cuestión que ha sido planteada muchas veces por los filósofos: ¿es posible hacer mediciones de todo aspecto de la naturaleza? ¿Es posible que ciertos aspectos del mundo o ciertos tipos de fenómenos sean, en principio, no medibles? Por ejemplo, algunos filósofos pueden admitir que en el mundo físico todo es medible (aunque otros nieguen aun esto), pero creen que en el mundo mental esto no es así. Algunos hasta llegan a sostener que nada mental es medible.

Un filósofo que adopte este punto de vista podría argumentar de la siguiente manera: "La intensidad de un sentimiento, de un dolor corporal o del grado de intensidad con el cual recuerdo un suceso pasado, en principio no es medible. Puedo sentir que mi recuerdo de un suceso es más intenso que mi recuerdo de otro, pero no puedo decir que uno es intenso en el grado 17 y el otro en el grado 12,5. La medición de la intensidad del recuerdo es, pues, imposible en principio."

En respuesta a este punto de vista, consideremos primero la magnitud física del peso. Recogemos una piedra. Es pesada. La comparamos con otra piedra mucho más liviana. Si examinamos ambas piedras, no llegaremos a ningún número ni encontraremos unidades discretas que puedan ser contadas. El fenómeno mismo no contiene nada numérico, sino solamente nuestras sensaciones particulares de peso. Como hemos visto en un capítulo anterior, sin embargo, introducimos el concepto numérico de peso estableciendo un procedimiento para medirlo. Somos *nosotros* quienes asignamos números a la naturaleza. Los fenómenos mismos sólo presentan cualidades que nosotros observamos. Con excepción de los números cardinales, que pueden ser correlacionados con objetos discretos, todo lo que es numérico lo introducimos nosotros cuando concebimos procedimientos para medir.

La respuesta a nuestra pregunta filosófica original debe ser esta, creo yo. Si en un ámbito de fenómenos encontramos suficiente orden como para hacer comparaciones y decir que, en algún aspecto, una cosa está por sobre otra y ésta, a su vez, por sobre otra, entonces hay, en principio, la posibilidad de efectuar mediciones. Es cuestión nuestra idear reglas mediante las cuales sea posible asignar números a los fenómenos de una manera útil. Como hemos visto, el primer paso consiste en hallar reglas de comparación; luego, si es posible, hallar reglas cuantitativas. Cuando asignamos números a los fenómenos, no tiene ningún sentido preguntarse

si son los números "correctos". Simplemente, construimos reglas que especifican cómo asignar números. Desde este punto de vista, no hay nada que no sea medible en principio.

Hasta en la psicología hacemos, de hecho, mediciones. La medición de sensaciones fue introducida en el siglo XIX; quizás el lector recuerde la ley de Weber-Fechner en lo que se llamaba por entonces el campo de la psicofísica. Primero se correlacionaba la sensación que se quería medir con algo físico; luego se establecían reglas para determinar el grado de intensidad de la sensación. Por ejemplo, se hicieron mediciones de la sensación de presión sobre la piel de diversos pesos, de la sensación de altura de un sonido, de la de intensidad de un sonido, etc. Una manera de medir la altura del sonido —aquí nos referimos a la sensación, no a la frecuencia de la onda sonora— es construir una escala basada en una unidad que sea la menor diferencia de altura que sea posible percibir. S. S. Stevens, en una época, propuso otro procedimiento basado en la identificación por el sujeto de una altura a la que considerara como exactamente intermedia entre otras dos alturas. Así, de maneras diversas, hemos logrado construir escalas de medida para ciertas magnitudes psicológicas. No es cierto, pues, que exista en principio una imposibilidad fundamental para aplicar el método cuantitativo a los fenómenos psicológicos.

Al llegar a este punto, debemos hacer un comentario sobre una limitación del procedimiento de medición. No hay la menor duda, por supuesto, que la medición es uno de los procedimientos básicos de la ciencia, pero, al mismo tiempo, debemos cuidarnos de sobreestimar su alcance. La especificación de un procedimiento de medición no siempre nos revela todo el significado de un concepto. Cuanto más estudiamos una ciencia avanzada, especialmente una ciencia tan ricamente elaborada como la física, tanto más conciencia adquirimos del hecho de que el significado total de un concepto no puede estar dado por un procedimiento de me-

dición. Esto es cierto hasta de los conceptos más simples.

Tomemos como ejemplo la longitud espacial. El procedimiento para medir la longitud con una vara rígida sólo puede ser aplicado dentro de cierta gama intermedia de valores que no son demasiado grandes ni demasiado pequeños. Se lo puede aplicar a longitudes que tengan la pequeñez de un milímetro o una fracción de milímetro, quizás, pero no a longitudes de un milésimo de milímetro. Las longitudes muy pequeñas no pueden ser medidas de esta manera. Ni podemos aplicar una vara de medir a la distancia que hay de la Tierra a la Luna. Ni siquiera la distancia que hay entre los Estados Unidos e Inglaterra puede ser medida mediante tal procedimiento sin construir primero un sólido puente que vaya de uno a otro país. Por supuesto, continuamos hablando de una distancia espacial entre los Estados Unidos e Inglaterra, por lo cual entendemos una distancia que *podría* ser medida con una vara de medir si la superficie terrestre entre los dos países fuera sólida. Pero la superficie no es sólida, de modo que, aun en este caso, debemos idear otros procedimientos para medir la longitud.

Uno de tales procedimientos es el siguiente. Por medio de una vara de medir determinamos una cierta distancia sobre la tierra, por ejemplo, entre los puntos *A* y *B* (ver Figura 10-1). Con esta línea *AB* como base, podemos determinar la distancia de *B* hasta un punto *C* remoto, sin usar una vara de medir. Por medio de instrumentos topográficos, medimos los dos ángulos, α y β. Los teoremas de la geometría física nos permiten calcular la longitud de la línea *a*, que es la distancia entre *B* y *C*. Conociendo esta distancia y midiendo los ángulos δ y γ, podemos calcular la distancia de *B* a un punto *D* aun más remoto. Así, mediante el proceso llamado "triangulación", podemos medir una larga red de distancias y, de esta manera, elaborar un mapa de una gran región.

Los astrónomos también usan la triangulación para medir distancias desde la tierra hasta estrellas relativamente

cercanas de nuestra galaxia. Por supuesto, las distancias terrestres son demasiado pequeñas para ser usadas como líneas de base, por lo cual los astrónomos utilizan la distancia que hay entre un punto de la órbita terrestre y el punto opuesto. Este método no es suficientemente exacto para me-

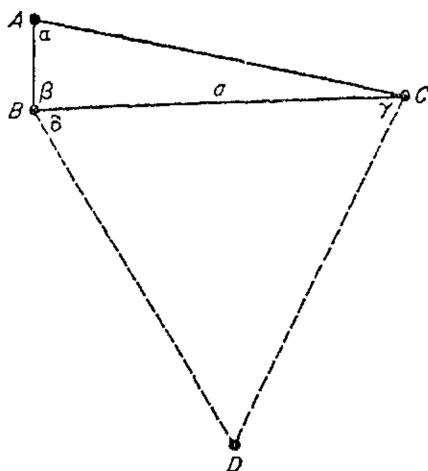


Figura 10-1.

dir las distancias de estrellas muy alejadas de nuestra galaxia o para medir las distancias de otras galaxias; para medir tales distancias enormes se utilizan otros métodos. Por ejemplo, puede determinarse el brillo intrínseco de una estrella mediante el análisis de su espectro; luego, comparando el brillo intrínseco o absoluto con el brillo aparente de la estrella tal como se lo ve desde la Tierra, puede estimarse su distancia. Hay muchas maneras de medir distancias a las que no es posible aplicar directamente una vara de medir. Observamos ciertas magnitudes y luego, sobre la base de leyes que vinculan esas magnitudes con otras, llegamos a una estimación indirecta de las distancias.

Al llegar a este punto, se plantea una cuestión importante. Si hay una docena de maneras diferentes de medir una cierta magnitud física como la longitud, ¿no deberíamos hablar de una docena de conceptos diferentes de magnitud, en lugar de uno solo? Esta fue la opinión que sostuvo el físico y filósofo de la ciencia P. W. Bridgman en su obra, hoy clásica, *The Logic of Modern Physics* (Macmillan, 1927). Bridgman dio énfasis a la tesis de que todo concepto cuantitativo debe ser definido por las reglas implicadas en el procedimiento para medirlo. Esto recibe el nombre, a veces, de "definición operacional" de un concepto. Pero, según Bridgman, si tenemos muchas definiciones operacionales diferentes de longitud, no debemos hablar *del* concepto de longitud. Y si lo hacemos, debemos abandonar la noción de que los conceptos se definen por los procedimientos de medición explícitos.

Mi opinión sobre esta cuestión es la siguiente. Creo que es mejor considerar los conceptos de la física como conceptos teóricos sujetos a un proceso de especificación cada vez más preciso, y no como conceptos definidos totalmente mediante reglas operacionales. En la vida cotidiana, hacemos diversas observaciones de la naturaleza. Describimos esas observaciones en términos cualitativos tales como "largo", "corto", "caliente", "frío", etc., y en términos comparativos tales como "más largo", "más corto", "más caliente", "más frío", etc. Este lenguaje de observación se vincula con el lenguaje teórico de la física por ciertas reglas operacionales. En el lenguaje teórico, introducimos conceptos cuantitativos como los de longitud y masa, pero no debemos concebir tales conceptos como definidos explícitamente. Más bien las reglas operacionales, junto con *todos* los postulados de la física teórica, sirven para dar definiciones parciales o, mejor dicho, interpretaciones parciales de los conceptos cuantitativos.

Sabemos que estas interpretaciones parciales no son definiciones finales y completas, porque la física las refuerza

constantemente con nuevas leyes y nuevas reglas operacionales. No se perfila el fin de este proceso, ya que la física está lejos de haber elaborado un conjunto completo de procedimientos; debemos admitir, pues, que sólo tenemos interpretaciones parciales e incompletas de todos los términos teóricos. Muchos físicos incluyen términos como "longitud" en el vocabulario de observación porque se los puede medir mediante procedimientos simples y directos. Yo prefiero no clasificarlos de esta manera. Es cierto que, en el lenguaje cotidiano, cuando decimos "la longitud de este borde de la mesa es de setenta centímetros", usamos "longitud" en un sentido que puede ser definido completamente por el procedimiento simple de la vara de medir. Pero esta sólo es una pequeña parte del significado total del concepto de longitud. Es un significado que sólo se aplica a cierta gama intermedia de valores a la cual puede aplicarse la técnica de la vara de medir. No se lo puede aplicar a la distancia entre dos galaxias o entre dos moléculas. Sin embargo, es evidente que, en los tres casos, tenemos *in mente* el mismo concepto. En lugar de decir que hay muchos conceptos de longitud, cada uno de ellos definido por un procedimiento operacional diferente, prefiero decir que tenemos un solo concepto de longitud, parcialmente definido por todo el sistema de la física, incluyendo las reglas para todos los procedimientos operacionales utilizados en la medición de la longitud.

Lo mismo puede decirse del concepto de masa. Si limitamos su significado a una definición basada en la balanza de platillos, sólo podemos aplicar el término a una pequeña gama intermedia de valores. No podemos hablar de la masa de la Luna o de una molécula; ni siquiera de la masa de una montaña o de una casa. Tendríamos que distinguir entre una serie de magnitudes diferentes, cada una de las cuales con su propia definición operacional. En los casos en los cuales es posible aplicar al mismo objeto dos métodos diferentes para medir la masa, tendríamos que decir que, en

esos casos, las dos magnitudes resultan tener el mismo valor. Todo esto conduciría, en mi opinión, a una manera indebidamente complicada de hablar. Parece mejor adoptar el tipo de lenguaje utilizado por la mayoría de los físicos y considerar la longitud, la masa, etc. como conceptos teóricos, y no como conceptos observacionales definidos explícitamente mediante ciertos procedimientos de medición.

Este enfoque no es más que una cuestión de preferencia en la elección de un lenguaje eficiente. No hay una sola manera de construir un lenguaje de la ciencia. Hay cientos de maneras diferentes. Sólo puedo decir que, en mi opinión, este enfoque de las magnitudes cuantitativas presenta muchas ventajas. No siempre he sostenido esta opinión. En una época, al igual que muchos físicos, yo consideraba los conceptos tales como longitud y masa como términos "observables" del lenguaje de observación. Pero luego me incliné cada vez más a ampliar el ámbito del lenguaje teórico e incluir en él a tales términos. Más adelante analizaremos los términos teóricos con mayor detalle. Ahora sólo quiero señalar que, en mi opinión, no se debe concebir los diversos procedimientos de medición como si definieran magnitudes de algún sentido definitivo. Son meramente casos especiales de lo que llamo "reglas de correspondencia". Sirven para conectar los términos del lenguaje de observación con los términos del lenguaje teórico.

XI

MERITOS DEL MÉTODO CUANTITATIVO

Los conceptos cuantitativos no están dados por la naturaleza, sino que surgen de nuestra práctica de aplicar números a los fenómenos naturales. ¿Cuáles son las ventajas de esto? Si las magnitudes cuantitativas nos fueran suministradas por la naturaleza, no haríamos esta pregunta, como no preguntamos cuáles son las ventajas de los colores. La naturaleza podría carecer de colores, pero es agradable encontrarlos en el mundo. Simplemente, están ahí, son parte de la naturaleza. No podemos impedirlo. La situación no es la misma con respecto a los conceptos cuantitativos. Ellos son parte de nuestro lenguaje, no de la naturaleza. Somos *nosotros* quienes los introducimos; por eso, es legítimo preguntar *por qué* lo hacemos. ¿Por qué nos tomamos el trabajo de idear reglas y postulados complicados para tener magnitudes que puedan ser medidas en escalas numéricas?

Todos conocemos la respuesta. Se ha dicho muchas veces que el gran progreso de la ciencia, especialmente en los últimos siglos, no habría sido posible sin el uso del método cuantitativo. (Fue utilizado por primera vez, de manera precisa, por Galileo. Otros ya habían usado el método antes, por supuesto, pero él fue el primero en establecer reglas explícitas.) Siempre que ello es posible, la física trata de introducir conceptos cuantitativos. En las últimas décadas, otros campos de la ciencia han seguido el mismo camino. No tenemos dudas de que esto es ventajoso, pero es conveniente saber con mayor detalle dónde reside exactamente la ventaja.

Ante todo, aumenta la eficiencia de nuestro vocabulario,

aunque esta es sólo una ventaja secundaria. Antes de la introducción de un concepto cuantitativo, hay docenas de términos o adjetivos cualitativos diferentes para describir los diversos estados posibles de un objeto con respecto a esa magnitud. Sin el concepto de temperatura, por ejemplo, tendríamos que decir de las cosas que están "muy calientes", "calientes", "cálidas", "tibias", "frescas", "frías", "muy frías", etc. Todos éstos constituyen lo que he llamado conceptos clasificatorios. Si tuviéramos algunos cientos de tales términos, quizás no sería necesario, para muchos propósitos cotidianos, introducir el concepto cuantitativo de temperatura. En lugar de decir "hay 30° hoy", tendríamos algún lindo adjetivo que expresara justamente esta temperatura, y para 100° tendríamos otro adjetivo, etc.

¿Qué tendría de malo esto? Entre otras cosas, recargaríamos excesivamente nuestra memoria. No sólo tendríamos que conocer un gran número de adjetivos diferentes, sino que también tendríamos que memorizar su orden, para poder saber inmediatamente si determinado término está más alto o más bajo en la escala que otro. Pero si introducimos el concepto de temperatura, que correlaciona los estados de un cuerpo con números, sólo tenemos que memorizar un término. El orden de magnitud lo da inmediatamente el orden numérico. Es verdad que previamente hemos memorizado los números, pero una vez logrado esto, podemos aplicar los números a cualquier magnitud cuantitativa. De no ser así, tendríamos que memorizar un conjunto diferente de adjetivos para cada magnitud y memorizar también, en cada caso, su orden específico. Estas son dos ventajas secundarias del método cuantitativo.

La ventaja principal, como hemos visto en capítulos anteriores, es que los conceptos cuantitativos nos permiten formular leyes cuantitativas. Estas leyes son mucho más poderosas, como maneras de explicar los fenómenos y como medio para predecir nuevos fenómenos. Aun con un lenguaje cualitativo enriquecido, con el cual nuestra memoria se re-

cargaría con cientos de adjetivos calificativos, hallaríamos gran dificultad para expresar hasta las leyes más simples.

Supongamos, por ejemplo, que estamos ante una situación experimental en la cual observamos que una cierta magnitud *M* depende de otra magnitud *P*. Diagramamos esta relación y obtenemos la curva que aparece en la Figura 11-1. En la línea horizontal de este gráfico, la magnitud *M* adopta los valores x_1, x_2... Para estos valores de *M*, la magnitud *P* adopta los valores y_1, y_2... Después de diagramar sobre el

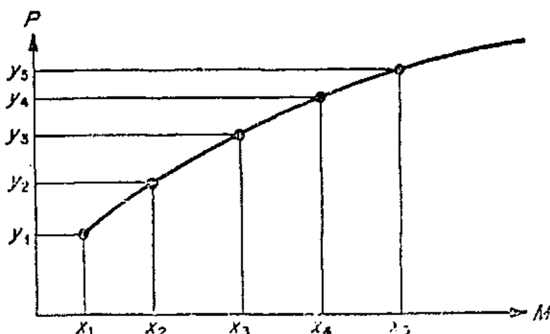


Figura 11-1.

gráfico los puntos correspondientes a estos valores, trazamos una curva a través de esos puntos. Quizás la curva resultante es una recta; en tal caso, decimos que *M* es una función lineal de *P*. Expresamos esto del siguiente modo: $P = aM + b$, donde *a* y *b* son parámetros que permanecen constantes en la situación dada. Si los puntos forman una curva de segundo grado, tenemos una función cuadrática. Quizás *M* es el logaritmo de *P*; o puede ser una función más complicada, que sea necesario expresar en términos de varias funciones simples. Después que hemos decidido cuál es la función más probable, hacemos ensayos, mediante observaciones repetidas, para ver si hemos encontrado una función que

represente una ley universal que vincule las dos magnitudes.

¿Qué sucedería en esta situación si no tuviéramos un lenguaje cuantitativo? Supongamos que tenemos un lenguaje cualitativo mucho más rico que el castellano actual. No disponemos de palabras como "temperatura" en nuestro lenguaje, pero tenemos, para cada cualidad, unos cincuenta adjetivos muy bien ordenados. Nuestra primera observación no sería $M = x_1$. Diríamos que el objeto observado es ..., y usaríamos acá uno de los cincuenta adjetivos que se refieren a M. Y en lugar de $P = y_1$, tendríamos otra oración en la cual usaríamos uno de los cincuenta adjetivos que se refieren a la cualidad P. Hablando estrictamente, los dos adjetivos no corresponden a puntos de los ejes de nuestro gráfico —es imposible disponer de suficientes adjetivos como para hacerlos corresponder a *todos* los puntos de una línea— sino a intervalos a lo largo de cada línea. Un adjetivo, por ejemplo, se referiría a un intervalo que contuviera a x_1. Los cincuenta intervalos ubicados a lo largo del eje para M, correspondientes a nuestros cincuenta adjetivos, tendrían límites borrosos; hasta podrían superponerse en cierta medida. En este lenguaje, no podríamos expresar una ley simple, por ejemplo, de la forma $P = a + bM + cM^2$. Tendríamos que especificar exactamente cómo hay que hacer corresponder cada uno de nuestros cincuenta adjetivos para M con uno de los cincuenta adjetivos para P.

Para ser más específicos, supongamos que M se refiere a cualidades de calor y P a colores. Una ley que conectara estas dos cualidades consistiría en un conjunto de cincuenta oraciones condicionales de la forma: "Si el objeto está muy, muy, muy caliente (por supuesto, tendríamos un adjetivo para expresar esto), entonces tendría un brillo rojo." En realidad, en castellano hay un gran número de adjetivos para los colores, pero es casi el único ámbito de cualidades para el cual disponemos de muchos adjetivos. Con referencia a la mayoría de las magnitudes físicas, hay una gran pobreza de adjetivos en el lenguaje cualitativo. Una ley ex-

presada en un lenguaje cuantitativo es, pues, mucho más breve y más simple que las engorrosas expresiones que necesitaríamos si tratáramos de expresar la misma ley en términos cualitativos. En lugar de una ecuación simple y reducida, tendríamos docenas de oraciones de la forma "si-entonces", cada una de las cuales haría corresponder un predicado de una clase con un predicado de otra clase.

Pero la ventaja más importante de la ley cuantitativa no es su brevedad, sino el uso que puede hacerse de ella. Una vez que damos a la ley forma numérica, podemos utilizar esa poderosa parte de la lógica deductiva a la que llamamos matemática y, de este modo, hacer predicciones. Por supuesto, también en el lenguaje cualitativo puede usarse la lógica deductiva para hacer predicciones. De la premisa "este cuerpo está muy, muy, muy caliente" podemos deducir la predicción "este cuerpo tendrá un brillo rojo". Pero este procedimiento sería engorroso comparado con los poderosos y eficientes métodos de deducción que forman parte de la matemática. Esta es la mayor ventaja del método cuantitativo. Nos permite expresar leyes de forma tal que, utilizando funciones matemáticas, podemos hacer predicciones de la manera más eficiente y precisa.

Estas ventajas son tan grandes que nadie pensaría en la actualidad en proponer que los físicos abandonen el lenguaje cuantitativo y vuelvan a un lenguaje cualitativo precientífico. En épocas anteriores de la ciencia, sin embargo, cuando Galileo calculaba las velocidades con las cuales las bolas ruedan por los planos inclinados y los períodos de un péndulo, había muchos que probablemente decían: "¿En qué nos beneficiará todo esto? ¿Qué ayuda nos brindará en la vida cotidiana? Nunca tendré que ocuparme de lo que les sucede a pequeños cuerpos esféricos cuando ruedan por una pista. Es cierto que a veces, cuando pelo guisantes, éstos ruedan por una tabla inclinada. Pero, ¿cuál es el valor de calcular su aceleración *exacta*? ¿Qué utilidad práctica puede tener tal conocimiento?"

En la actualidad, nadie habla de esta manera porque todos usamos docenas de complicados aparatos —automóviles, heladeras, televisores, etc.— que no habrían sido posibles, como sabemos, si la física no se hubiera desarrollado como ciencia cuantitativa. Tengo un amigo que adoptó una vez la actitud filosófica según la cual el desarrollo de la ciencia cuantitativa era lamentable porque conducía a una mecanización de la vida. Mi respuesta fue que, si quería ser coherente en sus actitudes, nunca debía usar un aeroplano, un automóvil o un teléfono. Abandonar la ciencia cuantitativa significaría abandonar todas aquellas comodidades que son el producto de la tecnología moderna. Creo que no hay muchas personas que anhelen esto.

Al llegar a este punto, nos enfrentamos con una crítica relacionada con las anteriores, aunque algo diferente, del método cuantitativo. ¿Realmente nos ayuda a *comprender* la naturaleza? Sin duda, podemos describir fenómenos en términos matemáticos, hacer predicciones e inventar máquinas complicadas; pero, ¿no hay una manera mejor de obtener una verdadera visión de los secretos de la naturaleza? El más grande de los poetas alemanes, Goethe, hizo tal crítica del método cuantitativo, por considerarlo inferior a un enfoque directo e intuitivo de la naturaleza. El lector probablemente lo conoce sólo como autor de dramas y poesías, pero en realidad estaba muy interesado en ciertas partes de la ciencia, particularmente la biología y la teoría de los colores. Escribió un gran libro sobre este último tema. A veces, creía que este libro era más importante que todas sus obras poéticas juntas.

Una parte del libro de Goethe trata de los efectos psicológicos de los colores. Está presentada sistemáticamente y es en realidad muy interesante. Goethe tenía gran sensibilidad para observar sus propias experiencias y, por esta razón, estaba bien calificado para analizar de qué manera nuestros estados de ánimo reciben la influencia de los colores que nos rodean. Todo decorador de interiores, por su-

puesto, conoce estos efectos. Mucho amarillo y rojo en una habitación es estimulante. Los verdes y los azules tienen un efecto tranquilizador. Cuando elegimos colores para nuestros dormitorios y livings, tomamos en consideración estos efectos psicológicos. El libro de Goethe también aborda la teoría física del color y contiene una parte histórica en la cual examina teorías anteriores, especialmente la de Newton. En principio, no le satisfacía el enfoque de Newton. Goethe sostenía que los fenómenos de la luz, en todos sus aspectos y especialmente en lo que respecta al color, sólo deben ser observados en las condiciones más naturales posibles. Su labor en la biología lo había llevado a la conclusión de que, si se quiere descubrir el carácter real de un roble o de un zorro, es necesario observar al árbol y al zorro en sus lugares naturales. Goethe trasladó esta noción a la física. La mejor manera de observar una tormenta de truenos es salir durante una tormenta y mirar al cielo. Lo mismo sucede con la luz y los colores. Es necesario verlos tales como aparecen en la naturaleza: la irrupción de la luz solar a través de una nube, la alteración de los colores del cielo cuando el sol se está poniendo, etc. Y al hacerlo, Goethe halló algunas regularidades. Pero cuando leyó en el famoso libro de Newton *Optica*, la afirmación de que la luz blanca del sol está compuesta realmente de todos los colores espectrales, Goethe se encolerizó mucho.

¿Por qué se encolerizó? Porque Newton no hizo sus observaciones de la luz en condiciones naturales. Por el contrario, hizo su famoso experimento puertas adentro, con un prisma. Oscureció su laboratorio e hizo una pequeña ranura en la persiana de la ventana (ver Figura 11-2), ranura que sólo permitía entrar a la habitación oscura un delgado rayo de luz solar. Cuando este rayo de luz pasó por el prisma, Newton observó que formaba sobre una pantalla una imagen de diferentes colores, que iban del rojo al violeta. Llamó a este diseño un espectro. Al medir los ángulos de refracción del prisma, llegó a la conclusión de que esos án-

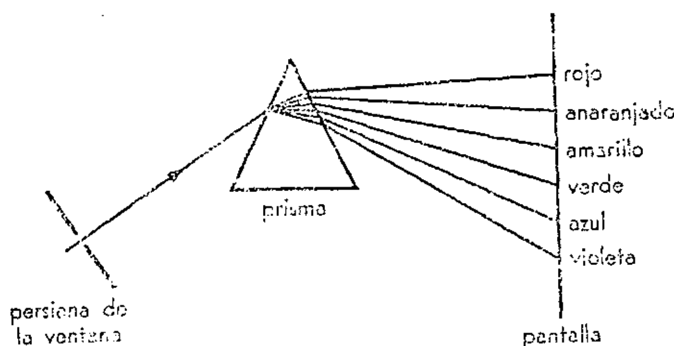


Figura 11-2.

gulos son diferentes para los diferentes colores, correspondiendo los más pequeños al rojo y los más grandes al violeta. Esto le inspiró la suposición de que el prisma no produce los colores, sino que simplemente separa los colores contenidos en el rayo de luz solar original. Confirmó esta suposición mediante otros experimentos.

Goethe planteó varias objeciones al enfoque general de la física adoptado por Newton e ilustrado por este experimento. Primero, sostenía, al tratar de comprender la naturaleza debemos confiar más en la impresión inmediata de nuestros sentidos que en el análisis teórico. Puesto que la luz blanca se presenta ante nuestros ojos como perfectamente simple e incolora, debemos aceptarla como tal y no representarla como compuesta de diferentes colores. A Goethe también le parecía equivocado observar un fenómeno natural como la luz solar en condiciones artificiales, experimentales. Si queréis comprender la luz solar, no debéis oscurecer vuestra habitación y luego triturar el rayo de luz haciéndolo pasar por una ranura estrecha. Debéis salir a cielo abierto y contemplar todos los sorprendentes fenómenos relativos a los colores tales como aparecen en su esce-

nario natural. Finalmente, era escéptico acerca de la utilidad del método cuantitativo. Hacer mediciones exactas de ángulos, distancias, velocidades, pesos, etc., y luego hacer cálculos matemáticos basados en los resultados de esas mediciones podría ser útil, admitía, para propósitos técnicos. Pero tenía serias dudas de que este fuera el enfoque más apropiado si lo que deseamos es obtener una visión real de las operaciones de la naturaleza.

En la actualidad, por supuesto, sabemos que en la controversia entre el método analítico, experimental y cuantitativo de Newton y el enfoque directo, cualitativo y fenomenológico de Goethe, el primero no sólo predominó en la física sino que está conquistando cada vez mayor aceptación también en otros campos de la ciencia, inclusive en las ciencias sociales. Ahora es obvio, especialmente en la física, que los grandes avances de los últimos siglos no habrían sido posibles sin el uso de métodos cuantitativos.

Por otra parte, no debemos subestimar el gran valor que puede tener un enfoque intuitivo como el de Goethe para el descubrimiento de nuevos hechos y la elaboración de nuevas teorías, especialmente en campos relativamente nuevos del conocimiento. La imaginación artística de Goethe, combinada con la observación cuidadosa, le permitió descubrir importantes hechos en la morfología comparada de los organismos vegetales y animales. Algunos de estos descubrimientos fueron reconocidos más adelante como jalones hacia la teoría de la evolución de Darwin. (Esto lo explicó el gran físico y fisiólogo alemán Hermann von Helmholtz en una conferencia de 1853 sobre los estudios científicos de Goethe. Helmholtz elogió mucho la labor de Goethe en la biología, pero criticó su teoría de los colores. En un agregado posterior a la conferencia y fechado en 1875, señaló que algunas de las hipótesis de Goethe, en el ínterin, habían sido confirmadas por la teoría de Darwin.)[1]

[1] *Die Farbenlehre* ("Teoría de los Colores") de Goethe era una maciza obra en tres partes publicada en Alemania en 1810. Una traduc-

Puede ser interesante mencionar que, a mediados del siglo anterior, el filósofo Arturo Schopenhauer escribió un pequeño tratado sobre la visión y los colores *(Uber das Sehn und die Farben)* en el cual sostuvo que Goethe tenía toda la razón y Newton estaba totalmente equivocado en su histórica controversia. Schopenhauer no sólo condenó la aplicación de la matemática a la ciencia, sino también la técnica de las pruebas matemáticas. Las llamaba "pruebas-tramperas" y citaba como ejemplo la prueba del conocido teorema de Pitágoras. Esta prueba, decía, es correcta; nadie puede contradecirla ni decir que es equivocada. Pero es una manera de razonar totalmente artificial. Cada paso es convincente, sin duda, pero al concluir la prueba se tiene la sensación de que uno ha quedado atrapado en una trampera para ratones. El matemático nos ha obligado a admitir la verdad del teorema, pero no hemos ganado ninguna comprensión real. Es como si se nos hubiera conducido por un laberinto. Repentinamente salimos del laberinto y nos decimos: "Sí, estoy aquí, pero realmente no sé cómo llegué aquí." Podrán decirse algunas cosas acerca de este punto de vista sobre la enseñanza de la matemática. Deberíamos prestar más atención a la comprensión intuitiva de lo que estamos haciendo en cada paso de una prueba y de por qué seguimos esos pasos. Pero todo esto es incidental.

Para dar una respuesta clara a la cuestión de si perdemos algo cuando describimos el mundo con números, como creen

---

ción inglesa de la Parte I, debida a Charles Eastlake, apareció en Londres en 1840. La conferencia de Helmholtz "On Goethe's Scientific Researches" apareció en sus *Popular Lectures on Scientific Subjects, First Series* (Nueva York: Longmans, Green, 1881) y fue reimpresa en sus *Popular Scientifics Lectures* (Nueva York: Dover, 1962). Se hallarán críticas similares en "Goethe's Farbenlehre", una alocución de John Tyndall, publicada en sus *New Fragments* (Nueva York: Appleton, 1892), y en la conferencia pronunciada en 1941 por Werner Heisenberg "The Teachings of Goethe and Newton on Colour in the Light of Modern Physics" publicada en *Philosophic Problems of Nuclear Science* (Londres: Faber & Faber, 1952).

algunos filósofos, debemos distinguir claramente entre dos situaciones lingüísticas: un lenguaje que realmente ignora ciertas cualidades de los objetos que describe y un lenguaje que *parece* ignorar ciertas cualidades pero que realmente no las ignora. Estoy convencido de que buena parte de la confusión que se manifiesta en el pensamiento de estos filósofos se debe al hecho de no establecer esta distinción.

La palabra "lenguaje" es usada aquí en un sentido extraordinariamente amplio. Se refiere a cualquier método mediante el cual se comunique información acerca del mundo: palabras, cuadros, diagramas, etc. Consideremos un lenguaje que ignora ciertos aspectos de los objetos que describe. En una revista vemos una fotografía en blanco y negro de Manhattan. Quizás el título dice: "Perspectiva de Nueva York, vista desde el oeste." Esta imagen comunica, en el lenguaje de las fotografías en blanco y negro, una información acerca de Nueva York. Aprendemos algo acerca de los tamaños y las formas de los edificios. La imagen es semejante a la impresión visual inmediata que tendríamos si estuviéramos en el lugar en el que estaba la cámara y miráramos hacia Nueva York. Por supuesto, es esta la razón por la cual comprendemos inmediatamente la fotografía. No es un lenguaje en el sentido corriente de la palabra; es un lenguaje en el sentido más general de que trasmite información.

Sin embargo, en la fotografía faltan muchas cosas. Carece de la dimensión de la profundidad. No nos dice nada acerca de los colores de los edificios. Esto no significa que no podamos realizar inferencias correctas acerca de la profundidad y del color. Si vemos una fotografía en blanco y negro de una cereza, supondremos que la cereza es roja. Pero esto es una inferencia. La fotografía no nos informa nada acerca del color de la cereza.

Pasemos ahora a la situación en la cual un lenguaje parece ignorar cualidades pero en realidad no es así. Examinemos una página de música. Al ver por primera vez la notación

musical, quizás de niños, podemos haber preguntado: "¿Qué cosas extrañas son esas? Hay cinco líneas que atraviesan la página y están cubiertas de manchas negras. Algunas de las manchas tienen colas."

Quizás se nos respondió: "Esto es música. Esta es una melodía muy hermosa."

Protestamos: "Pero, yo no oigo ninguna música."

Es cierto que esta notación no trasmite una melodía de la manera como lo hace un fonógrafo, por ejemplo. No hay nada que oír. Pero en otro sentido, la notación musical *trasmite* la altura y la duración de cada nota. No la trasmite de una manera significativa para un niño. Aun para un adulto la melodía puede no adquirir evidencia inmediata hasta no ejecutarla en un piano o hasta que alguna otra persona no la ejecuta para él. Sin embargo, no hay duda de que las notas de la melodía están implícitas en la partitura. Por supuesto, es necesario tener una clave para la traducción. Debe haber reglas que indiquen cómo transformar la partitura en sonidos. Pero si se conocen las reglas, podemos decir que las cualidades de las notas –su altura, su duración y hasta sus cambios de intensidad– están dadas en la partitura. Un músico experto hasta puede ser capaz de leer las notas y "oír" inmediatamente la melodía en su mente. Obviamente, tenemos aquí una situación lingüística muy diferente que en el caso de la fotografía en blanco y negro. La fotografía realmente ignora los colores. La notación musical parece ignorar las notas, pero, en verdad, no es así.

En el caso del lenguaje común, estamos tan acostumbrados a las palabras que a menudo olvidamos que no son signos naturales. Si oímos la palabra "azul", inmediatamente nos imaginamos el color azul. De niños nos formamos la impresión de que las palabras de nuestro lenguaje que designan colores realmente nos trasmiten el color. En cambio, si leemos la afirmación de un físico de que hay una cierta oscilación electromagnética de intensidad y frecuen-

cia determinadas, no nos imaginamos inmediatamente el color que describe. Pero si conocemos la clave para la traducción, podemos determinar el color tan exactamente, quizás hasta más exactamente, que si oyéramos la palabra que designa el color. La persona que trabaja con un espectroscopio sabe de memoria los colores que corresponden a las diversas frecuencias. En nuestro caso, la afirmación del físico puede revelarnos inmediatamente que se refiere a un color azul grisáceo.

Es posible establecer de muchas maneras diferentes la clave para la traducción. Por ejemplo, se puede indicar en un cuadro la escala de frecuencias del espectro visible, escribiendo debajo de cada frecuencia la palabra castellana que designa al color aproximadamente correspondiente a ella. O el cuadro puede tener, en lugar de las palabras, pequeños cuadrados con los colores mismos. En cualquier caso, al oír la afirmación cuantitativa del físico, se puede inferir, con ayuda de la clave, cuál es exactamente el color que está describiendo. La cualidad, en este caso el color, no se pierde para nada mediante este método de comunicación. Esta situación es análoga a la de la notación musical; existe una clave para determinar las cualidades que, en primera instancia, parecen omitidas en la notación. No es análoga a la fotografía en blanco y negro, en la cual están ausentes, en realidad, ciertas cualidades.

Las ventajas del lenguaje cuantitativo son tan obvias que cabe preguntarse por qué muchos filósofos han criticado su uso en la ciencia. En el Capítulo 12 examinaremos algunas de las razones que explican esta curiosa actitud.

XII

LA CONCEPCIÓN MÁGICA DEL LENGUAJE

Tengo la impresión de que una de las razones por las cuales algunos filósofos han objetado el énfasis que la ciencia pone en el lenguaje cuantitativo es que nuestra relación psicológica con las palabras de un lenguaje precientífico —palabras que hemos aprendido cuando éramos niños— es muy diferente de nuestra relación psicológica con las complicadas notaciones que hallamos en el lenguaje de la física. Es comprensible que los niños crean que ciertas palabras realmente contienen, por decir así, las cualidades a las que se refieren. No quiero ser injusto con ciertos filósofos, pero sospecho que, a veces, ellos cometen el mismo error, en sus reacciones ante las palabras y los símbolos científicos, que los niños.

En el conocido libro de C. K. Ogden e I. A. Richards, *The Meaning of Meaning* [1], hay excelentes ejemplos —algunos muy divertidos— de lo que los autores llaman "la magia de la palabra". Muchas personas tienen una concepción mágica del lenguaje, concepción según la cual existe una misteriosa conexión natural de algún género entre ciertas palabras (¡claro que se trata solamente de las palabras con las que están familiarizados!) y sus significados. La verdad es que sólo por accidente histórico, en la evolución de nuestra cultura, la palabra "azul" ha llegado a significar determinado color. En Alemania, a ese color se lo llama "blau". En otras lenguas hay otros sonidos asociados a él.

[1] C. K. Ogden e I. A. Richards, *The Meaning of Meaning* (Londres: Kegan Paul, Trench, Trubner, 1923); (48th rev. ed.; Nueva York: Harcourt, Brace, 1946); (Nueva York: Harvest Books, 1960).

Para los niños, es natural pensar que *la* palabra "azul", a la que están acostumbrados por su lengua materna, es la palabra natural y que otras palabras para designar el color azul son enteramente erróneas o, por cierto, extrañas. Al crecer, puede hacerse más tolerante y decir: "otras personas pueden usar la palabra 'blau', pero la usan para una cosa que *realmente* es azul". Un niño pequeño piensa que una casa es una casa y una rosa es una rosa, y esto es todo. Luego se entera que el extraño pueblo de Francia a una casa la llama "maison". ¿Por qué dicen "maison" cuando quieren decir una casa? Puesto que *es* una casa, ¿por qué no la llaman una casa? Se le explicará que en Francia la costumbre es decir "maison". Los franceses lo han dicho así durante cientos de años; no se les debe reprochar esto ni pensar que son estúpidos. El niño finalmente lo acepta. La gente extraña tiene hábitos extraños. Dejémoslos que usen la palabra "maison" para nombrar a esas cosas que realmente son casas. Apartarse de esta actitud tolerante y adquirir la comprensión de que no hay ninguna conexión esencial, cualquiera que sea, entre una palabra y su significado parece ser tan difícil para muchos adultos como para los niños. Por supuesto, nunca dicen abiertamente que la palabra castellana es la palabra correcta, que las palabras de otras lenguas son equivocadas, pero la concepción mágica de su infancia permanece implícita en su pensamiento y, a menudo, en sus observaciones.

Ogden y Richards citan un proverbio inglés: "The Divine is rightly so called" ("Lo Divino es así llamado correctamente"). Esto significa aparentemente que lo Divino realmente es divino; por lo tanto, es correcto llamarlo de tal modo. Aunque se pueda tener la sensación de que algo es llamado así correctamente, de hecho, el proverbio no dice nada. Obviamente, es vacuo. Sin embargo, la gente evidentemente lo repite con intensa emoción, pensando realmente que expresa alguna suerte de visión profunda de la naturaleza de lo Divino.

En un libro de Kurt Riezler, *Physics and Reality: Lectures of Aristotle on Modern Physics at an International Congress of Science, 679 Olympiad, Cambridge, 1940 A.D.* [2], hay un ejemplo más complicado de la concepción mágica del lenguaje. El autor imagina a Aristóteles volviendo a la tierra en nuestra época y presentando su punto de vista —que es también el de Riezler y, creo yo, solamente de Riezler— en lo concerniente a la ciencia moderna.

Aristóteles comienza elogiando en elevados términos a la ciencia moderna. Está lleno de admiración por sus grandes realizaciones. Luego agrega que, para ser honesto, también debe hacer unas pocas observaciones críticas. Son estas observaciones las que nos interesan. En la página 70 del libro de Riezler, Aristóteles dice a los físicos reunidos:

> El día está frío para un negro y cálido para un esquimal. Vosotros dirimís la disputa leyendo 20° en el termómetro.

Lo que Riezler quiere decir aquí es que, en el lenguaje cualitativo de la vida cotidiana, no nos ponemos de acuerdo acerca de palabras como "cálido" y "frío". Si un esquimal de Groenlandia llega a un lugar donde la temperatura es de 20°, dirá: "Hoy es un día más bien cálido." Un negro del África, en el mismo lugar, dirá: "Hoy es un día frío." Los dos hombres no están de acuerdo acerca de los significados de "cálido" y "frío". Riezler imagina que un físico les dice: "Olvidemos esas palabras y hablemos en términos de temperatura; entonces podremos llegar a un acuerdo. Estaremos de acuerdo en que la temperatura de hoy es de 20°."

Riezler continúa:

> Estáis orgullosos de haber encontrado la verdad objetiva eliminando...

Pido al lector que adivine lo que según Riezler han eliminado los físicos. Cabría esperar que la oración continua-

[2] El libro de Kurt Riezler fue publicado en 1940 por Yale University Press, New Haven, que me ha autorizado a citar el libro.

ra: "...eliminando las palabras 'cálido' y 'frío'". Los físicos, por supuesto, no eliminan estas palabras más que del lenguaje cuantitativo de la física. Pero lo conservan en el lenguaje cualitativo de la vida cotidiana. En realidad, el lenguaje cualitativo es esencial hasta para el físico, para describir lo que ve. Pero Riezler no continúa diciendo lo que esperábamos. Su enunciado continúa:

> ...eliminando al negro y al esquimal.

Cuando lo leí por primera vez pensé que decía algo un poco diferente y que su intención era afirmar que el físico elimina las maneras de hablar del negro y del esquimal. Pero no es así. Riezler quiere decir algo mucho más profundo. Más adelante, deja bien en claro que, en su opinión, la ciencia moderna ha eliminado al hombre, ha olvidado y despreciado al más importante de todos los temas del conocimiento humano: el hombre mismo.

> Estáis orgullosos de haber encontrado la verdad objetiva eliminando al negro y al esquimal. Admito la importancia de lo que habéis logrado. Admito también que no podéis construir vuestras maravillosas máquinas sin eliminar al negro y al esquimal. Pero, ¿qué sucede con la realidad y la verdad? Vosotros identificáis la verdad con la certidumbre. Pero, obviamente, la verdad se refiere al Ser o, si lo preferís, a algo llamado "realidad". La verdad puede llevar un alto grado de certidumbre, como seguramente la tiene la verdad en la matemática, y, no obstante esto, un bajo grado de "realidad". ¿Qué pasa con vuestros 20°? Puesto que es cierto tanto para el negro como para el esquimal, lo llamáis la realidad objetiva. Esta realidad vuestra me parece extremadamente pobre y tenue. Es una relación que vincula una propiedad llamada temperatura con la dilatación de vuestro mercurio. Esta realidad no depende del negro ni del esquimal. Sólo se relaciona con el observador anónimo.

Un poco más adelante, escribe:

> Por supuesto, sabéis muy bien que el calor y el frío relacionan los 20° con el negro o el esquimal.

No estoy muy seguro qué es lo que Riezler quiere decir aquí. Quizás quiere decir que, para que el negro y el es-

quimal comprendan el significado de "20°", es necesario explicárselos en términos de "cálido" y "frío".

> Decís que el sistema en observación debe ser ampliado para que incluya los sucesos físicos que se producen dentro del negro o el esquimal.

Se presume que esta es la respuesta del físico a la acusación: "¿No omitís las sensaciones de calor y de frío que experimentan, respectivamente, el esquimal y el negro?" Riezler parece pensar que el físico respondería algo semejante a esto: "No, no omitimos las sensaciones. Describimos también al negro mismo y al esquimal como organismos. Los analizamos como sistemas físicos; físicos y fisiológicos. Descubrimos lo que sucede dentro de ellos, y, de esta manera, podemos explicar por qué experimentan sensaciones diferentes que los llevan a describir el mismo día como 'cálido' y 'frío'." El pasaje continúa:

> Esto os pone frente a dos sistemas en los cuales el gradiente de temperatura se invierte, frío en un sistema y caliente en el otro. Este frío y este calor, sin embargo, no es todavía frío y calor. El negro y el esquimal están representados en vuestros sistemas por un compuesto de sucesos físicos o químicos; ya no son seres en sí mismos, son lo que son con respecto al observador anónimo, un compuesto de sucesos descripto por relaciones entre cantidades medibles. Tengo la impresión de que el negro y el esquimal están representados, en vuestra descripción, muy desvaídamente. Vosotros colocáis la responsabilidad en las enormes complicaciones implicadas en tal sistema.

Riezler se refiere aquí al sistema humano, al organismo total que, por supuesto, es enormemente complicado cuando tratáis de analizarlo físicamente. Luego continúa:

> No, caballeros, vosotros coordináis símbolos pero nunca describís lo frío como frío y lo caliente como caliente.

¡Aquí aparece, finalmente, al menos la leve sospecha de la magia de las palabras! El físico coordina símbolos artificiales que realmente no trasmiten nada semejante a las cualidades. Esto es infortunado, porque el físico es in-

capaz de describir lo frío como "frío". Llamarlo "frío" nos trasmite la sensación real. Todos nos estremecemos, al imaginarnos cuán frío estaba. O, decir "ayer hubo un calor terrible" nos trasmite la sensación real de calor. Esta es mi interpretación de lo que Riezler dice. Si el lector quiere dar una interpretación más benévola, es libre de hacerlo.

Más adelante (en la pág. 72), hay otra interesante declaración del Aristóteles de Riezler:

> Permítaseme volver a mi idea. La realidad es la realidad de las sustancias. Vosotros no conocéis las sustancias que están detrás de los sucesos a los que vuestro termómetro representa indicando 20°. Pero sabéis cómo son el negro y el esquimal...

Riezler quiere decir que sabéis cómo son el negro y el esquimal porque son humanos. Vosotros sois humanos, por lo tanto tenéis con ellos sentimientos comunes.

> ...Preguntadles, preguntaos vosotros mismos, preguntad a vuestro dolor y a vuestra alegría, a vuestra acción y a las acciones que se ejercen sobre vosotros. Allí sabréis qué significa la realidad. Allí las cosas son concretas. Allí sabéis que ellas *están*.

Riezler siente que sólo se puede alcanzar la *verdadera* realidad cuando hablamos del dolor y la alegría, del calor y del frío. Tan pronto como pasamos a los símbolos de la física –la temperatura, etc.– la realidad se desvanece. Tal es el juicio de Riezler. Estoy convencido que no es el de Aristóteles. Aristóteles es una de las mayores figuras de la historia del pensamiento; él tenía un supremo respeto por la ciencia. Él mismo hizo observaciones empíricas y experimentos. Si pudiera haber observado el desarrollo de la ciencia desde su época hasta la nuestra, estoy seguro de que estaría con entusiasmo en favor de la manera científica de pensar y hablar. En verdad, probablemente sería uno de los principales científicos de la actualidad. Creo que Riezler es sumamente injusto con Aristóteles al atribuirle esas opiniones.

Es posible, supongo, que Riezler sólo haya querido decir

que la ciencia no debe concentrarse tan exclusivamente en los conceptos cuantitativos que llegue a descuidar todos esos aspectos de la naturaleza que no se ajustan muy bien a las fórmulas con símbolos matemáticos. Si esto es todo lo que quiere decir, entonces, por supuesto, estaríamos de acuerdo con él. Por ejemplo, en el campo de la estética, no ha habido mucho progreso en la elaboración de conceptos cuantitativos. Pero siempre es difícil decir de antemano dónde será útil introducir la medición numérica. Debemos dejar este problema en manos de los que trabajan en cada campo de investigación. Si conciben alguna manera de hacerlo provechosamente, la introducirán. No debemos desanimar esos esfuerzos de antemano. Por supuesto que si se usa el lenguaje con propósitos estéticos —no como una investigación científica sobre estética, sino para proporcionar placer estético— entonces, no se plantea cuestión alguna acerca de lo inadecuado del lenguaje cuantitativo. Si queremos expresar nuestros sentimientos, en una carta a un amigo o en un poema lírico, naturalmente elegiremos un lenguaje cualitativo. Necesitamos palabras tan familiares para nosotros que inmediatamente despierten toda una variedad de significaciones y asociaciones.

También es cierto que, a veces, el científico descuida aspectos importantes hasta de los fenómenos en los que está trabajando. Pero esto, a menudo, sólo es una cuestión de división del trabajo. Un biólogo puede realizar toda su labor en el laboratorio. Estudia las células en un microscopio, realiza análisis químicos, etc. Otro biólogo puede salir a la naturaleza para observar cómo crecen las plantas, en qué condiciones los pájaros construyen sus nidos, etc. Los dos biólogos tienen intereses diferentes, pero el conocimiento que adquieren según sus diversos métodos forma parte de la ciencia en su totalidad. Ninguno de ellos debe suponer que el otro realiza una labor inútil. Si la intención de Riezler es, simplemente, advertirnos que la ciencia debe cuidar de no pasar por alto ciertas cosas, se puede coinci-

dir con él. Pero si quiere decir, como parece, que el lenguaje cuantitativo de la ciencia realmente omite ciertas cualidades, entonces, creo que está equivocado.

Permitidme citar una reseña bibliográfica del libro de Riezler realizada por Ernest Nagel.[3] "Las teorías de la física no son sustitutos del sol, las estrellas y las polifacéticas acciones de las cosas concretas. Pero, ¿por qué sería razonable esperar que las palabras nos calienten?"

Como veis, Nagel interpreta a Riezler de una manera aun menos caritativa de lo que he tratado de hacer yo. Quizás tenga razón. No estoy muy seguro. Nagel entiende a Riezler como si criticara el lenguaje del físico por no trasmitir directamente, en sentido enérgico, cualidades como los colores que emanen realmente de un cuadro colorido. De la misma manera, podríamos trasmitir información acerca de los olores esparciendo perfume, provocando olores reales, en lugar de nombrarlos. Quizás Riezler quiso decir —así lo entiende Nagel— que el lenguaje debe trasmitir cualidades en este sentido fuerte, que debe realmente llevar las cualidades hasta nosotros. Parece pensar que una palabra como "frío" a veces lleva en sí la cualidad real de la frialdad. Tal punto de vista es, ciertamente, un ejemplo de la concepción mágica del lenguaje.

[3] *Journal of Philosophy*, 37 (1940), 438-439.

Tercera Parte

LA ESTRUCTURA DEL ESPACIO

XIII

EL POSTULADO DE LAS PARALELAS DE EUCLIDES

La naturaleza de la geometría en la física es un tema de gran importancia en la filosofía de la ciencia y un tema en el cual, dicho sea de paso, tengo especial interés. Mi tesis de doctorado versaba sobre este tema y, si bien es poco lo que he publicado sobre el mismo desde entonces, he continuado pensando mucho acerca de él.

¿Por qué es tan importante? Ante todo, porque conduce a un análisis del sistema espaciotemporal, la estructura básica de la física moderna. Además, porque la geometría matemática y la geometría física son excelentes paradigmas de dos maneras fundamentalmente diferentes de obtener conocimiento: la apriorística y la empírica. Si comprendemos claramente la diferencia entre estas dos geometrías, obtendremos una valiosa comprensión de importantes problemas metodológicos de la teoría del conocimiento.

Consideremos primero la naturaleza de la geometría matemática. Sabemos, por supuesto, que la geometría fue uno de los primeros sistemas matemáticos que se elaboraron. Sabemos poco acerca de sus orígenes. Lo sorprendente es que ya se hallaba muy bien sistematizada en la época de Euclides. El carácter axiomático de la geometría de Euclides —la derivación de teoremas a partir de axiomas y postulados fundamentales— fue en sí mismo una contribución muy compleja y que aún desempeña un papel esencial en los métodos más modernos de dar una forma exacta a los sistemas matemáticos. Es asombroso que este procedimiento fuera ya adoptado en la época de Euclides.

Uno de los axiomas de Euclides, el axioma de las paralelas, perturbó a los matemáticos durante muchos siglos. Podemos enunciar este axioma del siguiente modo: en todo plano en el cual hay una recta *L* y un punto *P* exterior a *L*, hay una y sólo una recta *L'*, en el plano, que pase por *P* y sea paralela a *L*. (Se dice que dos rectas de un plano son paralelas si no tienen ningún punto común.)

El axioma parece tan obvio que hasta comienzos del siglo pasado nadie dudó de su verdad. El debate que se centró en él no se refería a su verdad, sino a su necesidad como *axioma.* Parecía menos simple que los otros axiomas de Euclides. Muchos matemáticos creían que podría ser un teorema que fuera posible deducir de los otros axiomas.

Se hicieron numerosos intentos para deducir el axioma de las paralelas de otros axiomas, y algunos matemáticos hasta sostuvieron que lo habían logrado. Hoy sabemos que estaban equivocados. No era fácil, por entonces, ver la falla de cada una de esas supuestas deducciones porque habitualmente se basaban —como se basan a menudo en los textos de geometría de la escuela secundaria— en un llamado a nuestra intuición. Trazamos un diagrama. Se admite que el diagrama es inexacto. No hay líneas perfectas, las líneas que trazamos tienen un espesor debido a la tiza en el pizarrón o a la tinta en el papel, pero el diagrama ayuda a nuestra imaginación. Nos ayuda a "ver" la verdad de lo que queremos probar. La filosofía de este enfoque intuitivo fue muy bien sistematizada por Immanuel Kant. No es nuestra impresión sensorial del diagrama físico, sino nuestra intuición interna de las configuraciones geométricas, la que no puede estar equivocada. Kant expresó esto con toda claridad. Nunca podemos estar seguros de que dos segmentos del pizarrón son iguales o que la línea trazada con la tiza y de la que se supone que es un círculo lo es realmente. Kant consideraba a tales diagramas solamente como apoyos psicológicos secundarios. Pero creía que nuestro poder de imaginación —al cual llamaba *Anschauung*, la

intuición— no fallaba. Si vemos claramente en nuestra mente una verdad geométrica, no con nuestros ojos, entonces la captamos con completa certidumbre.

¿Cómo abordaríamos, si fuéramos kantianos, la afirmación de que dos rectas no pueden tener más que un punto común? Imaginamos mentalmente la situación. He aquí dos rectas que se cortan en un punto. ¿Cómo pueden cortarse en alguna otra parte? Obviamente, no pueden cortarse en otro punto porque las rectas se alejan cada vez más a medida que nos apartamos del punto en el cual se cortan. Por lo tanto, parece claro que dos rectas o bien tienen todos los puntos en común (en cuyo caso coinciden y son una sola recta), o bien tienen a lo sumo un punto común, o bien no tienen ningún punto común. *Vemos* inmediatamente, decía Kant, estas verdades simples de la geometría. Captamos su verdad intuitivamente. El hecho de que no tengamos que basarnos en diagramas llevó a Kant a suponer que podemos tener completa confianza en las verdades percibidas de esta manera intuitiva. Más adelante volveremos a esta concepción. La mencionamos aquí sólo para ayudar al lector a comprender cómo concebían la geometría los científicos de comienzos del siglo XIX. Aunque no hubieran leído jamás a Kant, tenían la misma concepción. No interesa que esta derivara de Kant o formara parte de la atmósfera cultural que Kant hizo explícita. Todos suponían que hay verdades claras, simples y básicas de la geometría que están más allá de la duda. A partir de estas verdades simples, los axiomas de la geometría, se puede llegar paso a paso a ciertas verdades derivadas, los teoremas.

Como hemos dicho, algunos matemáticos creían que podían derivar el axioma de las paralelas de los otros axiomas de Euclides. ¿Por qué era tan difícil determinar las fallas de sus pruebas? La respuesta está en el hecho de que, por entonces, no existía una lógica suficientemente poderosa como para suministrar reglas estrictamente lógicas para las demostraciones geométricas. En algún lugar de la deduc-

ción se deslizaba un llamado a la imaginación, a veces de manera muy explícita, a veces de manera oculta. Sólo después de la elaboración de una lógica sistematizada, en la segunda mitad del siglo anterior, se dispuso de un método para distinguir entre una derivación puramente lógica y una derivación que introduce componentes no lógicos basados en la intuición. El hecho de que esta nueva lógica fuera formulada en símbolos aumentó su eficiencia, pero ello no era absolutamente esencial. Lo esencial era, primero, que las reglas podían ser enunciadas con total exactitud, y segundo, que a través de toda la derivación no se hacía ninguna afirmación que no pudiera obtenerse a partir de las premisas o de resultados obtenidos previamente mediante la aplicación de las reglas de inferencia de la lógica.

Antes de la creación de la lógica moderna, no existía ningún sistema lógico con un conjunto de reglas adecuadas para abordar la geometría. La lógica tradicional sólo trataba de predicados monádicos, pero en la geometría debemos considerar relaciones entre muchos elementos. Un punto de una línea o una línea de un plano son ejemplos de relaciones diádicas; un punto que está entre otros dos es una relación triádica. Podemos concebir la congruencia entre dos segmentos de recta como una relación diádica, pero, puesto que no se acostumbra a tomar los segmentos de recta como entidades primitivas, se representa mejor un segmento por un par de puntos. En este caso, la congruencia entre dos segmentos de recta es una relación entre un par de puntos y otro par de puntos; dicho de otra manera, es una relación tetrádica entre puntos. Como se ve, la geometría requiere una lógica de las relaciones. Esta lógica no existía en la época a la cual nos estamos refiriendo. Después de creada, se revelaron las fallas lógicas de varias presuntas pruebas del axioma de las paralelas. En algún punto de esas argumentaciones, se apelaba a una premisa que se basaba en la intuición y no podría ser derivada lógicamente de los otros axiomas de Euclides. Esto podría haber dado

origen a situaciones interesantes, de no haber sido por el hecho de que la premisa oculta e intuitiva resultó ser, en todos los casos, el mismo axioma de las paralelas.

Un ejemplo de tal axioma disimulado equivalente al de las paralelas es el siguiente: si en un plano hay una recta *L* y una curva *M* y si todos los puntos de *M* están a igual distancia de *L* entonces *M* es también una línea recta. Esto se muestra en la Figura 13-1, donde *a* es la distancia cons-

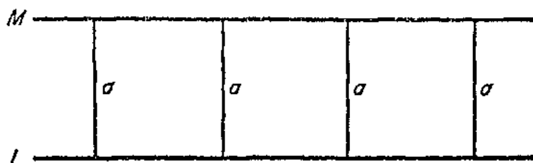


Figura 13-1.

tante con respecto a *L* de todos los puntos de *M*. Este axioma, que parece intuitivamente verdadero, era adoptado a veces como suposición tácita en los intentos por demostrar el axioma de las paralelas. Cuando se lo adopta, en efecto, es posible demostrar el axioma de las paralelas. Desgraciadamente, la suposición misma no puede ser demostrada, a menos que supongamos la verdad del axioma de las paralelas o de algún otro axioma equivalente a él.

Otro axioma equivalente al de las paralelas, aunque quizás no sea tan intuitivamente obvio como el citado, es la suposición de que figuras geométricas de tamaños diferentes pueden ser semejantes. Por ejemplo, se dice que dos triángulos son semejantes si tienen ángulos iguales y lados proporcionales. En la Figura 13-2, la razón $a:b$ es igual a la razón $a':b'$, y la razón $b:c$ es igual a la razón $b':c'$. Supongamos que dibujo primero el triángulo más pequeño, de lados *a*, *b* y *c*. ¿Hay un triángulo mayor que tenga los mismos ángulos y cuyos lados a', b' y c' estén en la misma

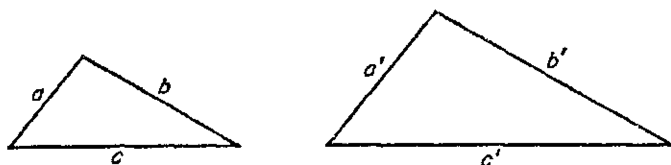


Figura 13-2.

proporción que *a*, *b* y *c*? Parece obvio que la respuesta es afirmativa. Supongamos que deseamos construir el triángulo mayor de tal modo que sus lados midan exactamente el doble que los lados del triángulo más pequeño. Podemos hacerlo fácilmente, como se ve en la Figura 13-3. Simple-

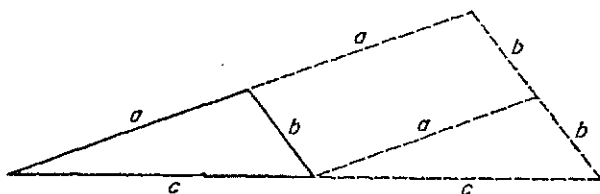


Figura 13-3.

mente prolongamos el lado *a* con otro segmento de la misma longitud, hacemos lo mismo con el lado *c* y luego unimos los extremos. Después de un poco de reflexión, parece evidente que el tercer lado debe tener una longitud $2b$ y que el triángulo grande será semejante al pequeño. Si aceptamos esto como axioma, entonces podemos demostrar el axioma de las paralelas; pero, nuevamente, estamos suponiendo el axioma de las paralelas en forma disimulada. La verdad es que no podemos probar la semejanza de los dos triángulos sin utilizar el axioma de las paralelas u otro axioma equivalente a éste. Usar el axioma acerca de los

triángulos semejantes, pues, equivale a usar el axioma de las paralelas, es decir, el mismo axioma que estamos tratando de demostrar.

Hasta el siglo XIX no pudo demostrarse, mediante una prueba lógica rigurosa, que el axioma de las paralelas es independiente de los otros axiomas de Euclides. No se lo puede deducir de ellos. Los enunciados negativos como este, los enunciados que afirman la imposibilidad de hacer algo, habitualmente son mucho más difíciles de probar que los enunciados positivos. Un enunciado positivo según el cual esto o aquello *puede* ser deducido de ciertas premisas se demuestra simplemente indicando los pasos lógicos de la deducción. Pero, ¿cómo es posible probar que algo *no* es deducible? Si fracasamos en cientos de intentos por deducirlo, podemos abandonar la tarea, pero esto no es una prueba de imposibilidad. Puede ser que alguien, quizás de alguna manera insospechada e indirecta, encuentre una deducción. Sin embargo, aunque era difícil, finalmente se logró una prueba formal de la independencia del axioma de las paralelas.

La exploración de las consecuencias de este descubrimiento resultó ser una de las actividades más apasionantes de la matemática del siglo XIX. Si el axioma de las paralelas es independiente de los otros axiomas de Euclides, entonces se lo puede sustituir por un enunciado incompatible con él sin contradecir lógicamente los otros axiomas. Ensayando alternativas diferentes, se crearon nuevos sistemas axiomáticos llamados geometrías no-euclidianas o no-euclídeas. ¿Cómo era menester concebir estos extraños sistemas nuevos, con teoremas tan contrarios a la intuición? ¿Debían ser considerados solamente como un juego lógico inofensivo, un juego con enunciados para ver cómo es posible combinarlos sin incurrir en contradicción lógica? ¿O se los debía considerar como posiblemente "verdaderos", en el sentido de que quizás fueran aplicables a la estructura del espacio?

Esta última posibilidad parecía tan absurda por aquel

entonces que nadie soñó siquiera con plantearla. En realidad, cuando unos pocos audaces matemáticos comenzaron a estudiar sistemas no-euclídeos, vacilaron en publicar sus investigaciones. Hoy nos podemos reír de esto y preguntarnos por qué la publicación de un sistema matemático tenía que despertar algún tipo de reacciones emocionales. En la actualidad, a menudo adoptamos un enfoque puramente formal de un sistema axiomático. No preguntamos cuáles interpretaciones o aplicaciones puede tener, sino solamente si el sistema de axiomas es lógicamente consistente y si determinado enunciado es derivable de él. Pero no era esta la actitud de la mayoría de los matemáticos del siglo XIX. Para ellos, un "punto" de un sistema geométrico significaba una posición en el espacio de la naturaleza; una "línea recta" del sistema significaba una línea recta en el sentido corriente. No se consideraba a la geometría como un ejercicio de lógica, sino como una investigación del espacio que está alrededor de nosotros, no del espacio en el sentido abstracto que dan hoy los matemáticos a esa palabra cuando hablan de un espacio topológico, un espacio métrico, un espacio pentadimensional, etc.

Carl Friedrich Gauss, uno de los más grandes matemáticos –si no *el* más grande– del siglo XIX, fue el primero, por lo que sabemos, que descubrió un sistema consistente de geometría en el cual el axioma de las paralelas había sido reemplazado por otro axioma incompatible con el anterior. No sabemos esto por una publicación del mismo, sino por una carta que escribió a un amigo. En esta carta, se refiere al estudio de tal sistema y a la derivación de algunos interesantes teoremas. Agrega que no se preocupó por publicar esos resultados porque temía la "gritería de los beocios". El lector quizás sepa que, en la antigua Grecia, los beocios, habitantes de la provincia de Beocia, no eran muy bien considerados. Podemos traducir su declaración a una jerga moderna del siguiente modo: "esos campesinos se reirán y dirán que estoy loco". Pero por "campesinos" Gauss no en-

tendía la gente inculta; aludía a ciertos profesores de matemáticas y de filosofía. Sabía que éstos pensarían que desvariaba al tomar en serio una geometría no-euclidiana.

Si abandonamos el axioma de las paralelas, ¿qué podemos colocar en su lugar? La respuesta a este interrogante, una de las cuestiones más importantes de la historia de la física moderna, será considerada en detalle en los capítulos 14 al 17.

XIV

LAS GEOMETRÍAS NO-EUCLIDIANAS

En la búsqueda de un axioma que reemplace al de las paralelas de Euclides, podemos seguir dos caminos opuestos:

(1) Podemos decir que, en un plano, por un punto exterior a una recta no pasa *ninguna* paralela (Euclides había dicho que pasa exactamente una).

(2) Podemos decir que pasa *más de una* paralela (se demuestra luego que si hay más de una paralela, entonces habrá un número infinito de paralelas).

La primera de estas posibilidades que se apartan de Euclides fue explorada por el matemático ruso Nikolai Lobachevski, la segunda por el matemático alemán Georg Friedrich Riemann. En el cuadro de la Figura 14-1, he

tipo de geometría	número de paralelas	suma de ángulos en triángulo	razón de la circunferencia al diámetro del círculo	medida de curvatura
Lobachevski	∞	$<180°$	$>\pi$	<0
Euclides	1	$180°$	π	0
Riemann	0	$>180°$	$<\pi$	>0

Figura-14-1.

colocado las dos geometrías no-euclidianas por encima y por debajo de la euclidiana para destacar sus desviaciones en direcciones opuestas con respecto a la estructura euclidiana.

La geometría de Lobachevski, quien publicó su obra en 1835, fue descubierta independientemente de éste y casi simultáneamente con él por el matemático húngaro Johann Bolyai, quien publicó sus resultados tres años antes. Riemann elaboró su geometría unos veinte años después. Si el lector quiere conocer algo más sobre el tema de las geometrías no-euclidianas, hay varios libros buenos sobre el tema. Uno de ellos es *La Geometría No-euclidiana* del matemático italiano Roberto Bonola. Contiene los dos artículos de Bolyai y Lobachevski, que son interesantes de leer en su forma original. Creo que el mejor libro que examina la geometría no-euclidiana desde el punto de vista que hemos adoptado aquí, o sea, el de su importancia para la filosofía de la geometría y del espacio, es el de Hans Reichenbach *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre,* publicado en 1928 y del cual hay ahora una traducción inglesa con el título de *The Philosophy of Space and Time.* Si el lector está interesado por el punto de vista histórico, puede consultar el libro de Max Jammer *Concepts of Space: the History of Theories of Space in Physics.* Los análisis de Jammer son a veces un poco metafísicos. No estoy seguro si esto se debe a sus propias ideas o a las de los pensadores que analiza; como fuere, es uno de los pocos libros que tratan en detalle la evolución histórica de la filosofía del espacio.

Examinemos más minuciosamente las dos geometrías no-euclidianas. En la geometría de Lobachevski, llamada en la jerga técnica geometría hiperbólica, hay un número infinito de paralelas. En la geometría de Riemann, llamada geometría elíptica, no hay paralelas. ¿Cómo es una geometría en la que no hay paralelas? Podemos comprenderlo si pensamos en un modelo que no es exactamente el de una geometría elíptica, pero es semejante a ella: el de la geometría esférica. El modelo es simplemente la superficie de una esfera. Consideramos a esta superficie como análoga a un plano. Las rectas de un plano están representadas aquí por los círculos máximos de la esfera. En términos más gene-

rales, decimos que, en toda geometría no-euclidiana, las líneas que corresponden a las rectas de la geometría euclidiana son "líneas geodésicas". Comparten con las rectas la propiedad de ser la distancia más corta entre dos puntos dados. En nuestro modelo, la superficie de la esfera, la distancia más corta entre dos puntos, la geodésica, es una parte de un círculo máximo. Los círculos máximos son las curvas que se obtienen intersectando la esfera con un plano que pasa por el centro de ésta. El ecuador y los meridianos terrestres son ejemplos conocidos.

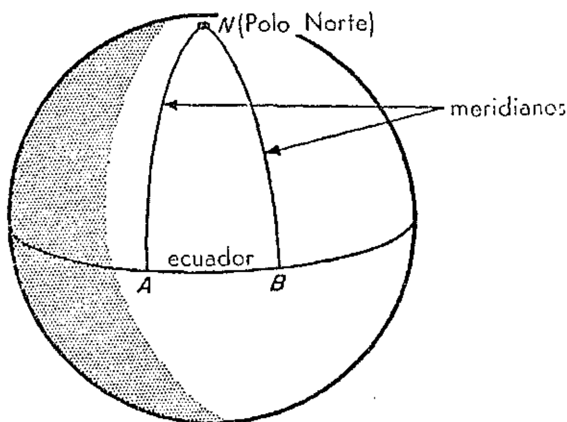


Figura 14-2.

En la Figura 14-2 hemos indicado dos meridianos perpendiculares al ecuador. En la geometría euclidiana, dos líneas perpendiculares a una línea dada son paralelas, pero en la esfera estas líneas se encuentran en el Polo Norte y en el Polo Sur. En la esfera no hay líneas rectas o, más bien, casi rectas, es decir, círculos máximos, que no se corten. Aquí tenemos, pues, un modelo fácilmente concebible de una geometría en la cual no hay paralelas.

Las dos geometrías no-euclidianas también se diferencian en lo concerniente a la suma de los ángulos de un triángulo. Esta diferencia es importante desde el punto de vista de las investigaciones empíricas sobre la estructura del espacio. Gauss fue el primero que comprendió claramente que sólo una investigación empírica del espacio permitirá determinar la naturaleza de la geometría que mejor lo describe. Una vez que comprendemos que las geometrías no-euclidianas pueden ser lógicamente consistentes, ya no podemos decir, sin hacer ensayos empíricos, cuál es la geometría aplicable a la naturaleza. A pesar del prejuicio kantiano prevaleciente en su época, Gauss quizás realizó realmente un experimento de este tipo.

No es difícil darse cuenta de que ensayar triángulos es mucho más fácil que ensayar paralelas. Las líneas que se suponen paralelas pueden no cortarse hasta después de prolongárselas por muchos miles de millones de kilómetros, pero la medición de los ángulos de un triángulo puede ser realizada en una pequeña región del espacio. En la geometría euclidiana la suma de los ángulos de un triángulo es igual a dos ángulos rectos, o sea, 180 grados. En la geometría hiperbólica de Lobachevski, la suma de los ángulos de un triángulo es menor que 180 grados. En la geometría elíptica de Riemann, la suma es mayor que 180 grados.

En la geometría elíptica, es fácil comprender la diferencia con respecto a los 180 grados con ayuda de nuestro modelo, la superficie de una esfera. Consideremos el triángulo *NAB* de la Figura 14-2; está formado por segmentos de dos meridianos y el ecuador. Los dos ángulos del ecuador tienen 90 grados, de modo que ya tenemos un total de 180 grados. Si sumamos el ángulo del Polo Norte, la suma será mayor que 180. Si trasladamos los meridianos hasta que se corten en ángulo recto, todos los ángulos del triángulo serán rectos y su suma será igual a 270 grados.

Sabemos que Gauss pensó efectuar la medición de la suma de los ángulos de un enorme triángulo estelar, y hay noti-

cias de que realmente llevó a cabo una medición similar, en escala terrestre, triangulando tres cimas montañosas en Alemania. Era profesor en Gotinga, y se dice que eligió una colina cercana a la ciudad y dos cumbres montañosas que podían ser vistas desde la cumbre de la primera colina. Ya había realizado una importante labor en la aplicación de la teoría de la probabilidad a los errores de medición y esta prueba le habría suministrado la oportunidad de utilizar esos procedimientos. El primer paso habría sido medir los ángulos ópticamente desde cada cumbre, repitiendo la medición muchas veces. Tomando el promedio de estos resultados de la observación con ciertas restricciones, era posible determinar el tamaño más probable de cada ángulo y, por ende, el valor más probable de su suma. A partir de la dispersión de los resultados, podía calcular el error probable; esto es, un cierto intervalo alrededor del promedio tal que la probabilidad de que el valor verdadero estuviera dentro del intervalo fuera igual a la probabilidad de que estuviera fuera del mismo. Se dice que Gauss realizó esta prueba y halló que la suma de los tres ángulos no era exactamente igual a 180 grados, pero que se desviaba de este valor en una cantidad tan pequeña que caía dentro del intervalo del error probable. Este resultado indicaría que el espacio es euclidiano o que, si no lo es, la desviación es sumamente pequeña, menor que el error probable de las mediciones.

Aun cuando Gauss no haya realizado verdaderamente tal prueba, como indican las investigaciones eruditas recientes, la leyenda misma constituye un importante jalón en la historia de la metodología científica. Gauss fue, sin duda, el primero en plantear el revolucionario interrogante: ¿qué encontraremos si efectuamos una investigación empírica sobre la estructura geométrica del espacio? Nadie había pensado antes en realizar tal investigación. En realidad, se la consideraba absurda, como tratar de descubrir por medios empíricos el producto de siete por ocho. Supongamos que

tenemos 7 cestos, cada uno de los cuales contiene 8 pelotas. Contamos todas las pelotas muchas veces. La mayoría de las veces obtenemos 56, pero ocasionalmente obtenemos 57 o 55. Tomamos el promedio de estos resultados para hallar el valor verdadero de siete por ocho. El matemático francés P. E. B. Jourdain en una oportunidad sugirió en broma que la mejor manera de lograr esto sería no realizar el recuento uno mismo, pues uno no es experto en contar. Los expertos son los mozos de restaurante, quienes constantemente suman y multiplican números. Es necesario reunir a los mozos más experimentados y preguntarles cuánto es siete por ocho. No cabe esperar muchas desviaciones en sus respuestas, pero si usamos números mayores, por ejemplo, 23 por 27, puede haber alguna dispersión. Tomamos el promedio de todas sus respuestas, estimadas según el número de mozos para cada respuesta, y sobre esta base obtenemos una estimación científica del producto de 23 por 27.

Para los contemporáneos de Gauss todo intento de investigar empíricamente un teorema geométrico les parecía tan absurdo como el ejemplo anterior. Concebían la geometría de la misma manera que concebían la aritmética. Creían, con Kant, que nuestra intuición no comete errores geométricos. Cuando "vemos" algo en nuestra imaginación, no puede ser de otra manera. Que alguien midiera los ángulos de un triángulo —no por diversión o para ensayar la calidad de instrumentos de óptica, sino para hallar el valor verdadero de su suma— les parecía totalmente absurdo. Con un poco de conocimiento de la geometría euclidiana, todo el mundo puede ver que la suma *debe* ser igual a ciento ochenta grados. Por esta razón, se dice, Gauss no dio a conocer el hecho de que había realizado tal experimento, ni siquiera que lo considerara digno de ser llevado a cabo. Sin embargo, como resultado de la continua reflexión acerca de las geometrías no-euclidianas, muchos matemáticos comenzaron a comprender que estas extrañas geometrías nuevas planteaban un genuino problema empírico. Gauss mismo no halló

una respuesta concluyente, pero dio un fuerte estímulo a la manera no kantiana de concebir todo el problema de la estructura del espacio de la naturaleza.

Para comprender más claramente en qué difieren las diversas geometrías no-euclidianas, consideremos nuevamente la superficie de una esfera. Como hemos visto, se trata de un modelo conveniente que nos ayuda a comprender de manera intuitiva la estructura geométrica de un plano del espacio riemanniano. (Por espacio riemanniano entendemos aquí lo que se llama un espacio elíptico. La expresión "espacio riemanniano" tiene también un significado más general que aclararemos posteriormente.)

Debemos cuidarnos de no extender demasiado la analogía entre el plano riemanniano y la superficie de la esfera, porque dos líneas rectas de un plano del espacio riemanniano sólo tiene un punto común, mientras que las líneas de la esfera que corresponden a las rectas –los círculos máximos– siempre se cortan en *dos* puntos. Consideremos, por ejemplo, dos meridianos. Ellos se cortan en el Polo Norte y en el Polo Sur. Hablando estrictamente, nuestro modelo corresponde al plano riemanniano sólo si nos limitamos a una parte de la superficie esférica que no contiene puntos opuestos, como los polos Norte y Sur. Si tomamos la esfera total como modelo, debemos suponer que cada punto del plano riemanniano está representado en la superficie de la esfera por un par de puntos opuestos. Partir del Polo Norte y llegar hasta el Polo Sur de la Tierra correspondería, a partir de un punto del plano riemanniano, seguir en línea recta sobre el plano y retornar al mismo punto. Todas las geodésicas del espacio riemanniano tienen la misma longitud finita y son cerradas, como la circunferencia de un círculo. Este gran alejamiento de nuestra intuición que supone este hecho es, probablemente, la razón por la cual este tipo de geometría fue descubierto después que la geometría de Lobachevski.

Con ayuda de nuestro modelo esférico, vemos fácilmente

que, en el espacio riemanniano, la razón de la circunferencia del círculo a su diámetro es siempre menor que pi. La Figura 14-3 muestra un círculo terrestre cuyo centro es el

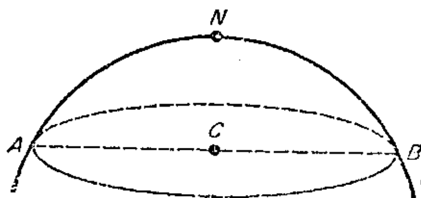


Figura 14-3.

Polo Norte. Esto corresponde a un círculo en el plano riemanniano. Su radio no es la línea *CB*, porque ésta no yace en la superficie esférica, que es nuestro modelo. El radio es el arco *NB* y el diámetro es el arco *ANB*. Sabemos que la circunferencia de este círculo está en la razón pi con respecto al segmento *ACB*. Puesto que el arco *ANB* es más largo que el segmento *ACB*, es obvio que la razón del perímetro del círculo *ANB* (el diámetro del círculo en el plano riemanniano) debe ser menor que pi.

No es tan fácil ver que en el espacio de Lobachevski sucede exactamente lo contrario: la razón de la circunfe-

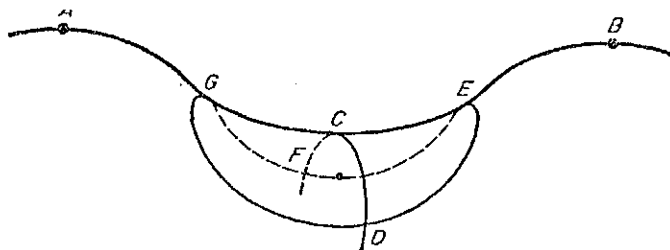


Figura 14-4.

rencia al diámetro debe ser mayor que pi. Quizás podamos visualizarlo con ayuda de otro modelo. Este modelo (que aparece en la Figura 14-4) no puede ser utilizado para todo el plano lobachevskiano, y, ciertamente, tampoco para el espacio lobachevskiano tridimensional, pero se lo puede utilizar para una porción limitada del plano lobachevskiano. El modelo es una superficie con forma de montura que se asemeja a un paso entre dos montañas. *A* es una cumbre montañosa, *C* es el paso y *B* la otra cumbre montañosa. Tratemos de visualizar esta superficie. Hay una curva, quizás un camino, que pasa por el punto *F* de la parte más alejada del paso, asciende por el paso a través del punto *C* y luego desciende por el lado más cercano del paso a través del punto *D*. La parte de esta superficie que tiene forma de montura, inclusive los puntos *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, pueden ser considerados como un modelo de la estructura de un plano lobachevskiano.

¿Qué forma tiene un círculo en este modelo? Supongamos que el centro del círculo está en *C*. La línea curva *DEFGD* representa la circunferencia de un círculo, es decir, que todos los puntos de la misma se encuentran a la misma distancia del centro *C*. Si nos encontramos en el punto *D*, nos hallaremos debajo del centro del círculo; si caminamos por el círculo hasta *E*, nos hallaremos por encima del centro. No es difícil ver que esta línea ondulada, que corresponde a un círculo del plano lobachevskiano, debe ser más larga que un círculo común de un plano euclidiano cuyo radio sea *CD*. Puesto que es más largo, la razón de la circunferencia de este círculo a su diámetro (el arco *FCD* o el arco *GCE*) debe ser mayor que pi.

Es posible construir un modelo más exacto, que corresponde precisamente en todas las mediciones a una parte del plano lobachevskiano, tomando una cierta curva, llamada tractriz (el arco *AB* en la Figura 14-5), y haciéndola rotar alrededor del eje *CD*. La superficie engendrada por esta rotación es llamada una seudoesfera. Quizás el lector ha

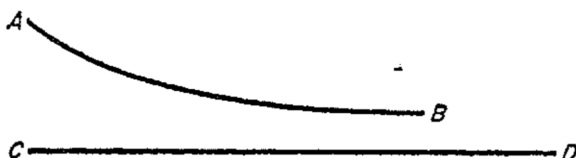


Figura 14-5.

visto un modelo en yeso mate de esta superficie. Si estudia tal modelo, podrá ver que los triángulos de su superficie tienen tres ángulos cuya suma es menor que 180 grados y que los círculos tienen una razón de la circunferencia al diámetro que excede de pi. Cuando mayor es un círculo, en tal superficie, tanto mayor es la desviación de esa razón con respecto a pi. No debemos suponer por ello que pi no sea una constante. Pi es la razón de la circunferencia al diámetro de un círculo del plano euclidiano. Este hecho no cambia por la existencia de geometrías no euclidianas en las cuales la razón de la circunferencia al diámetro del círculo sea una variable que puede ser mayor o menor que pi.

Todas las superficies euclidianas y no-euclidianas, tienen en todos sus puntos una medida, llamada la "medida de curvatura" de esta superficie en ese punto. La geometría de Lobachevski se caracteriza por el hecho de que, en cualquier punto de cualquier plano, la medida de curvatura del plano es negativa y constante. Hay un número infinito de geometrías lobachevskianas diferentes. Cada una de ellas está caracterizada por un parámetro fijo –un número negativo– que es la medida de curvatura de un plano en esta geometría.

Podría objetarse que, si es un plano, entonces no puede tener curvatura. Pero "curvatura" es un término técnico y no se lo debe entender aquí en el sentido corriente. En la geometría euclidiana medimos la curvatura de una línea en cual-

quier punto tomando el recíproco de su "radio de curvatura". El "radio de curvatura" es el radio de cierto círculo que coincide, por decirlo así con una parte infinitesimal de la línea en el punto en cuestión. Si una línea curva es casi recta, el radio de curvatura es largo. Si la línea es muy curva, el radio es corto.

¿Cómo se mide la curvatura de una superficie en un punto? Medimos primero la curvatura de dos geodésicas que se interceptan en este punto y se extienden en dos direcciones, llamadas las "direcciones principales" de la superficie en ese punto. Una dirección da la curvatura máxima de una geodésica en ese punto y la otra da la curvatura mínima. Luego definimos la curvatura de la superficie en tal punto como el producto de los dos recíprocos de los dos radios de curvatura de ambas geodésicas. Por ejemplo, consideramos el paso montañoso indicado en la Figura 14-4. ¿Cómo medimos la curvatura de esta superficie en el punto *C*? Vemos que una geodésica, el arco *GCE*, se curva de una manera cóncava (mirando la superficie hacia abajo), mientras que la geodésica perpendicular a ella, el arco *FCD*, se curva de una manera convexa. Estas dos geodésicas dan las curvaturas máxima y mínima de la superficie en el punto *C*. Por supuesto, si miramos hacia *arriba* esta superficie desde la parte de abajo, el arco *GCE* aparece convexo y el arco *FDC* cóncavo. Pero no interesa para nada el lado desde el cual contemplamos la superficie ni cuál curva consideramos convexa y cuál cóncava. Por convención, a un lado lo llamamos positivo y al otro negativo. El producto de los recíprocos de estos dos radios, $\frac{1}{R_1 \, R_2}$, nos da la medida de curvatura de la superficie en forma de montura en el punto *C*. En cualquier punto de esta superficie, un radio de curvatura será positivo y el otro negativo. El producto de los dos recíprocos de los radios y, en consecuencia, la medida de curvatura de la superficie serán siempre negativos.

No sucede lo mismo con una superficie que es completa-

mente convexa, como una esfera o un huevo. En tal superficie, las dos geodésicas, en las dos direcciones principales, se curvarán de la misma manera. Una geodésica puede curvarse más pronunciadamente que la otra, pero ambas se curvan de la misma manera. Tampoco en este caso interesa si consideramos tal superficie de un lado y decimos que los dos radios de curvatura son positivos o si la consideramos del otro lado y los llamamos negativos. El producto de sus recíprocos será siempre positivo. Por lo tanto, en cualquier superficie convexa como la de la esfera, la medida de curvatura en cualquier punto será positiva.

La geometría lobachevskiana, representada por el modelo de la superficie en forma de montura, puede ser caracterizada de esta manera: para todo espacio lobachevskiano, hay un cierto valor negativo que es la medida de curvatura de cualquier punto de cualquier plano de este espacio. La geometría riemanniana, representada por la superficie esférica, puede ser caracterizada de una manera similar: para todo espacio riemanniano, hay un cierto valor positivo que es la medida de curvatura de cualquier punto de cualquier plano de este espacio. Ambos son espacios de curvatura constante. Esto significa que, para todo espacio semejante, la medida de curvatura de cualquier punto de cualquier plano es la misma.

Sea k la medida de curvatura. En el espacio euclidiano, que también tiene curvatura constante, $k = O$. En el espacio de Lobachevski, $k < O$. En el espacio riemanniano, $k > O$. Estos valores numéricos no están determinados por los axiomas de la geometría. Eligiendo diferentes valores positivos para k, se obtienen diferentes espacios riemannianos; y eligiendo valores negativos diferentes para k, se obtienen diferentes espacios lobachevskianos. Aparte del valor del parámetro k, todos los teoremas son iguales en todos los espacios lobachevskianos y lo mismo en todos los espacios riemannianos. Por supuesto, los teoremas de cada geometría son muy diferentes de los de la otra.

Es importante comprender que el término "curvatura" en su sentido original y literal sólo se aplica a la superficie de un *modelo euclidiano* de un plano no-euclidiano. La esfera y la seudoesfera son superficies curvas en este sentido. Pero la expresión "medida de curvatura" aplicada a planos no-euclidianos no significa que estos planos se "curven" en el sentido ordinario. Se justifica la generalización del término "curvatura" y su aplicación a planos no-euclidianos porque la estructura geométrica interna de un plano riemanniano es igual a la estructura de la superficie de una esfera euclidiana; lo mismo es cierto de la estructura del plano en un espacio lobachevskiano y la superficie de una seudoesfera euclidiana. Los científicos a menudo adoptan un viejo término y le dan un significado más general. Esto no provocó ninguna dificultad durante el siglo XIX, porque sólo los matemáticos estudiaban las geometrías no euclidianas. Los inconvenientes comenzaron cuando Einstein utilizó la geometría no-euclidiana en su teoría general de la relatividad. Con esto, el tema pasó del campo de la matemática pura al de la física, donde se convirtió en una descripción del mundo real. La gente quería entender lo que Einstein estaba haciendo, por lo cual se escribieron libros para explicar estas cuestiones a los legos. En esos libros, los autores a veces hablaban de "planos curvos" y "espacios curvos". Se trata de una manera de hablar sumamente infortunada y engañosa. Deberían haber dicho: "hay una cierta medida k —a la cual los matemáticos llaman 'medida de curvatura', pero no prestéis atención a esta expresión— y esta k es positiva en el interior del Sol y negativa en el campo gravitacional del Sol. A medida que nos alejamos del Sol, el valor negativo de k se acerca a cero."

En lugar de decirlo de esta manera, los divulgadores decían que Einstein había descubierto que los planos de nuestro espacio son curvos. Esto sólo podía confundir al lego. Los lectores preguntaban qué quería decir que los planos son curvos. Si son curvos, pensaban, no se los debe lla-

mar planos. Tales alusiones al espacio curvo llevó a la gente a creer que todas las cosas están distorsionadas o curvadas en el espacio. A veces, los autores de libros sobre la relatividad hasta llegaban a decir que la fuerza gravitacional curva los planos. Describían esto con verdadero calor, como si fuera análogo a curvar una lámina metálica. Este tipo de especulaciones condujo a consecuencias extrañas, y algunos autores objetaron la teoría de Einstein sobre esta base. Todo esto podía haberse evitado si se hubiera evitado el término "curvatura".

Por otra parte, no es fácil introducir un término totalmente diferente de otro que ya es habitual en la matemática. El mejor procedimiento, por ello, es aceptar el término "curvatura" como un término técnico, pero comprender claramente que es menester no vincularlo con viejas asociaciones. No hay que concebir un plano no-euclidiano como si tuviera una forma "curvada", de modo que ya no fuera un plano. No tiene la estructura interna de un plano euclidiano, pero es un plano en el sentido de que la estructura de una de sus caras es exactamente igual a la estructura de la otra cara. Vemos aquí el peligro de decir que la esfera euclidiana es un modelo del plano riemanniano, porque, si se piensa en una esfera, se concibe su interior como muy diferente del exterior. Desde el interior la superficie parece cóncava; desde el exterior, es convexa. Esto no es cierto del plano en el espacio lobachevskiano ni en el riemanniano. En ambos espacios las dos caras del plano son idénticas. Si nos alejamos del plano de un lado, no observamos nada diferente de lo que observamos si nos alejamos del plano del otro lado. Pero la estructura interna del plano es tal que podemos, con ayuda del parámetro k, medir su grado de "curvatura". Debemos recordar que esta es una curvatura en un sentido técnico, y no es lo mismo que nuestra comprensión intuitiva de la curvatura en el espacio euclidiano.

Otra confusión terminológica, fácil de disipar, se refiere a los dos significados (a los cuales aludimos antes, en este

capítulo) de la expresión "geometría riemanniana". Cuando Riemann concibió su geometría de curvatura positiva constante, se la llamó riemanniana para distinguirla del anterior espacio lobachevskiano, en el cual la curvatura constante es negativa. Posteriormente, Riemann elaboró una teoría generalizada de los espacios de curvatura variable, espacios que no han sido tratados axiomáticamente. (Las formas axiomáticas de la geometría no-euclidiana, en la cual se conservan todos los axiomas de Euclides excepto el de las paralelas, al que se reemplaza por un nuevo axioma, se limitan a los espacios de curvatura constante.) En la teoría general de Riemann, se considera cualquier número de dimensiones y, en todos los casos, la curvatura puede variar continuamente de un punto a otro.

Cuando los físicos hablan de "geometría riemanniana", se refieren a la geometría generalizada de la cual las viejas geometrías riemanniana y lobachevskiana (hoy llamadas geometrías elíptica e hiperbólica, respectivamente) constituyen, junto con la geometría euclidiana, los casos especiales más simples. Además de éstos, la geometría riemanniana generalizada contiene gran variedad de espacios de curvatura variable. Entre ellos se encuentra el espacio que adoptó Einstein para su teoría general de la relatividad.

XV

POINCARÉ VERSUS EINSTEIN

Henri Poincaré, famoso matemático y físico francés y autor de muchos libros sobre filosofía de la ciencia, escritos la mayoría de ellos antes de la época de Einstein, dedicó mucha atención al problema de la estructura geométrica del espacio. Una de sus importantes concepciones es tan esencial para la comprensión de la física moderna que vale la pena examinarla con algún detalle.[1]

Supongamos, escribía Poincaré, que los físicos descubrieran que la estructura del espacio real difiere de la geometría euclidiana. En tal caso, los físicos tendrían que optar en la alternativa: o bien aceptar la geometría no-euclidiana como descripción del espacio físico, o bien conservar la geometría euclidiana y adoptar nuevas leyes según las cuales todos los cuerpos sólidos sufren ciertas contracciones y expansiones. Como hemos visto en capítulos anteriores, para hacer mediciones exactas con una vara de acero, debemos efectuar correcciones que tomen en cuenta las dilataciones térmicas o las contracciones de la vara. Análogamente, decía Poincaré, si las observaciones sugirieran que el espacio es no-euclidiano, los físicos podrían conservar el espacio euclidiano introduciendo en sus teorías nuevas fuerzas, fuerzas que dilataran o contrajeran los cuerpos sólidos, en condiciones especificadas.

También sería necesario introducir nuevas leyes en el campo de la óptica, puesto que podemos estudiar la geo-

[1] La tesis de Poincaré sobre esta cuestión se halla expuesta explícitamente en su libro *Science and Hypothesis* (Londres: 1905; Nueva York: Dover, 1952).

metría física por medio de rayos de luz. Se supone que estos rayos son líneas rectas. El lector recordará que los tres lados del triángulo de Gauss, cuyos vértices eran montañas, no consistían en varas sólidas —ya que las distancias eran demasiado grandes— sino en rayos de luz. Supongamos que se hallara que la suma de los ángulos de un gran triángulo de esta especie es diferente de 180°, decía Poincaré. En lugar de abandonar la geometría euclidiana, podríamos decir que la diferencia se debe a una curvatura de los rayos de luz. Si introducimos nuevas leyes para la deflexión de los rayos de luz, siempre podremos hacerlo de tal manera que sea posible conservar la geometría euclidiana.

Se trata de una idea sumamente importante. Más adelante, trataré de explicar cuál era exactamente el significado que le asignaba Poincaré y cómo se la puede justificar. Además de esta idea de largo alcance, Poincaré predijo que los físicos siempre elegirían el segundo camino. Preferirían conservar la geometría euclidiana, sostenía, porque es mucho más simple que la no-euclidiana. Por supuesto, no sabía que Einstein pronto iba a proponer la adopción de un complejo espacio no-euclidiano. Probablemente sólo pensaba en los espacios no-euclidianos más simples, de curvatura constante; de lo contrario, sin duda habría considerado aun *menos* probable que los físicos abandonaran a Euclides. Introducir algunas modificaciones en las leyes concernientes a los cuerpos sólidos y a los rayos de luz le parecía justificado a Poincaré, sobre la base de que ello permitiría conservar el sistema, más simple, de Euclides. Irónicamente, unos pocos años después, en 1915, Einstein elaboró su teoría general de la relatividad, en la cual se adoptaba la geometría no-euclidiana.

Es importante comprender el punto de vista de Poincaré, pues nos ayudará a comprender las razones de Einstein para abandonarlo. Trataremos de aclararlo de una manera intuitiva, no mediante cálculos y fórmulas, para que podamos visualizarlo. Con tal fin, usaremos un recurso utilizado por

Hermann von Helmholtz, el gran físico alemán, muchas décadas antes que Poincaré escribiera sobre el tema. Helmholtz quería mostrar que Gauss tenía razón al considerar la estructura geométrica del espacio como un problema empírico. Imaginémonos, decía, un mundo bidimensional en el cual seres bidimensionales caminen y arrastren objetos. Estos seres y todos los objetos de su mundo son completamente chatos, como los seres bidimensionales de la divertida fantasía de Edwin A. Abbot, *Flatland*. No viven en un plano, sino sobre la superficie de una esfera. La esfera es gigantesca en relación con su tamaño; ellos tienen las dimensiones de las hormigas y la esfera tiene el tamaño de la Tierra. Es tan grande que nunca pueden dar la vuelta completa alrededor de ella. En otras palabras, sus movimientos se limitan a un dominio reducido de la superficie de la esfera. La cuestión es la siguiente: ¿pueden estos seres, haciendo mediciones internas sobre su superficie bidimensional, descubrir si viven en un plano, una esfera o una superficie de otro tipo?

Helmholtz respondía afirmativamente. Pueden construir un gran triángulo y medir los ángulos. Si la suma de los ángulos fuera mayor a 180°, sabrían que viven en una superficie de curvatura positiva; si hallaran la misma curvatura positiva en todos los puntos de su continente, sabrían que viven en la superficie de una esfera o una parte de una esfera (si la esfera es o no completa es otra cuestión). La hipótesis de que todo su universo es una superficie esférica sería razonable. Nosotros, por supuesto, podemos ver de una ojeada que es una esfera porque somos seres tridimensionales que estamos fuera de ella. Pero Helmholtz puso en claro que los seres bidimensionales, al medir los ángulos de un triángulo o la razón de la circunferencia al diámetro (u otras magnitudes), pueden calcular la medida de curvatura en cada punto de su superficie. Gauss tenía razón, pues, al pensar que podía determinar mediante mediciones si nuestro espacio tridimensional tiene una cur-

vatura positiva o negativa. Si imaginamos a nuestro espacio sumergido en un universo de mayor número de dimensiones, podemos hablar de una curvatura real de nuestro espacio, pues a seres tetradimensionales se les aparecería como curvo.

Debemos examinar esto un poco más minuciosamente. Supongamos que los seres bidimensionales descubren que, cuando miden triángulos con sus varas de medida, en cada punto de su continente hay la misma curvatura positiva para triángulos del mismo tamaño. Entre esos seres hay dos físicos, F_1 y F_2. F_1 sostiene la teoría T_1, según la cual la región en la cual vive él y sus semejantes forma parte de una superficie esférica S_1. Su colega, el físico F_2, sostiene la teoría T_2, según la cual esa región es una superficie plana S_2. En la Figura 15-1 se ven esas dos superficies de perfil. Supongamos que en S_1 hay cuerpos bidimensionales rígidos como seres vivientes y varas de medir, que se mueven sin cambiar de tamaño o de forma. Para todo cuerpo de S_1 existe un cuerpo plano correspondiente en S_2, que es su proyección, proyección que se obtiene, por ejemplo, mediante líneas paralelas perpendiculares al plano S_2 (en la figura, estas paralelas aparecen como líneas punteadas). Si un cuerpo de S_1 se traslada de la posición A_1 a la A'_1, su

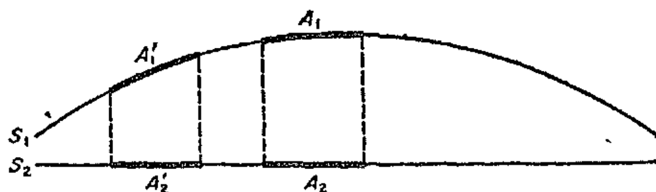


Figura 15-1.

sombra en S_2 se traslada de A_2 a A'_2. Supongamos que los cuerpos de S_1 son rígidos; en tal caso la longitud A_1 es igual a la longitud A'_1. Pero esto significa que A'_2 debe ser más corta que A_2.

Helmholtz señaló que, cuando medimos algo con una vara de medir, lo que realmente observamos no es nada más que una serie de coincidencias entre puntos. Podemos ver esto fácilmente mediante nuestra anterior descripción de la medición del borde de una hendidura, en el comienzo del Capítulo 9.

Contemplemos una vez más la Figura 15-1. La proyección de S_1 en S_2 es llamada una transformación biunívoca. (Esto no se podría hacer si S_1 fuera una esfera completa, pero hemos supuesto que S_1 sólo es una región limitada de una esfera.) Para todo punto de S_1, hay exactamente un punto correspondiente en S_2. Por lo tanto, a medida que los seres se mueven en S_1, observando coincidencias puntuales entre sus varas de medir y lo que miden, los seres correspondientes de S_2 hacen exactamente las mismas observaciones sobre los cuerpos correspondientes. Puesto que se supone que los cuerpos de S_1 son rígidos, los cuerpos correspondientes de S_2 no pueden serlo. Deben sufrir ciertas contracciones y dilataciones como las que hemos indicado en la Figura.

Volvamos a los dos físicos, F_1 y F_2, que sostienen teorías diferentes acerca de la naturaleza de su mundo plano. F_1 dice que este mundo debe formar parte de una esfera. F_2 insiste en que es un plano pero que los cuerpos se dilatan y se contraen de ciertas maneras predecibles, cuando se mueven. Por ejemplo, se hacen más largos cuando se mueven hacia la parte central de S_2, y más cortos cuando se alejan del centro. F_1 sostiene que los rayos de luz son geodésicas de la superficie curva S_1; esto es, siguen los arcos de círculos máximos. Estos arcos se proyectan en S_2 como arcos de elipses. F_2, para defender su teoría de que el mundo es plano, debe idear teorías ópticas en las cuales los rayos de luz sigan caminos elípticos.

¿Cómo pueden decidir los dos físicos cuál de ellos tiene razón? La respuesta es que no hay manera de decidirlo. El físico F_1 afirma que su mundo es parte de la superficie de

una esfera y que los cuerpos no sufren contracciones ni dilataciones, con excepción, por supuesto, de los fenómenos (o, más bien, los análogos bidimensionales de tales fenómenos) de la dilatación térmica, la extensión elástica, etc. El físico F_2 describe el mismo mundo de una manera diferente. Piensa que es un plano, pero que los cuerpos se dilatan y se contraen de determinada manera a medida que se mueven por la superficie. Nosotros, que estamos en un espacio tridimensional, podemos observar este mundo bidimensional y ver si es una esfera o un plano, pero los dos físicos están limitados a su mundo. En principio, no pueden decidir cuál es la teoría correcta. Por esta razón, decía Poincaré, ni siquiera debemos plantear la cuestión de quién tiene razón. Las dos teorías no son más que dos métodos diferentes para describir el mismo mundo.

Hay una infinidad de maneras diferentes por las cuales los físicos de la esfera podrían describir su mundo y, según Poincaré, es totalmente materia de convención cuál de ellas elijan. Un tercer físico podría sostener la fantástica teoría de que el mundo tiene esta forma:



Podría defender tal teoría introduciendo leyes aun más complicadas de la mecánica y la óptica, leyes que hicieran a todas las observaciones compatibles con la teoría. Por razones prácticas, ningún físico de la esfera querría sostener tal teoría. Pero, insistía Poincaré, no hay ninguna razón lógica para que no pudiera hacerlo.

Podemos imaginar a un análogo bidimensional de Poincaré diciendo a los físicos rivales: "No es necesario disputar. Vosotros simplemente estáis dando descripciones diferentes de la misma totalidad de hechos." Leibniz, como recor-

dará el lector, ya había defendido un punto de vista similar. Si no hay, en principio, ninguna manera de decidir entre dos enunciados, declaraba Leibniz, no debemos decir que tienen significados diferentes. Si todos los cuerpos del universo duplicaran su tamaño durante la noche, ¿nos parecería extraño el mundo a la mañana siguiente? Leibniz decía que no. El tamaño de nuestros propios cuerpos se duplicaría, de modo que no habría ningún medio de determinar el cambio. Análogamente, si todo el universo se desplazara a una distancia de 10 kilómetros, no podríamos discernirlo. Afirmar que tal cambio se ha producido sería, pues, carente de sentido. Poincaré adoptó esta idea de Leibniz y la aplicó a la estructura geométrica del espacio. Podemos hallar indicios experimentales de que el espacio físico es no-euclidiano, pero siempre podemos conservar el espacio euclidiano, más simple, si estamos dispuestos a pagar un precio por ello. Como hemos visto, Poincaré no creía que este precio llegara a ser nunca demasiado alto.

Hay dos puntos básicos que hemos intentado aclarar con nuestro ejemplo del mundo plano y que aplicaremos a nuestro mundo real. Primero, utilizando procedimientos comunes para la medición, procedimientos a los que estamos acostumbrados. Podemos llegar al resultado de que el espacio tiene una estructura no-euclidiana. Algunos filósofos recientes (Hugo Dingler, por ejemplo), no han comprendido esto. Sostienen que nuestros procedimientos para la medición emplean instrumentos construidos de acuerdo con la suposición de que la geometría es euclidiana; por lo tanto, estos instrumentos no pueden brindarnos resultados que no sean euclidianos. Esta afirmación es equivocada, por cierto. Nuestros instrumentos ocupan partes tan minúsculas del espacio que la cuestión relativa a si éste difiere o no del de la geometría euclidiana no interviene en su construcción. Consideremos, por ejemplo, el aparato de un topógrafo para medir ángulos. Contiene un círculo dividido en 360 partes iguales, pero es un círculo tan pequeño que, aunque el es-

pacio real difiriera del euclidiano hasta un grado que Gauss tenía la esperanza de poder medir (un grado mucho mayor que la diferencia prevista por la teoría de la relatividad), ello no tendría ningún efecto sobre la construcción de ese círculo. En regiones pequeñas del espacio, la geometría euclidiana sería válida con una aproximación muy elevada. Esto es lo que se expresa a veces diciendo que el espacio no-euclidiano tiene una estructura euclidiana en regiones pequeñas. Desde un punto de vista matemático estricto, se trata de un límite. Cuanto menor es la región del espacio, tanto más se asemeja su estructura a la euclidiana. Pero nuestros instrumentos de laboratorio ocupan porciones tan minúsculas del espacio que podemos descartar totalmente toda influencia que el espacio no-euclidiano pueda tener en su construcción.

Aun cuando la diferencia con respecto a la geometría euclidiana fuera tan grande que la suma de los ángulos de un triángulo pequeño (por ejemplo, un triángulo trazado sobre una mesa de dibujo) difiriera considerablemente de 180 grados, este hecho podría ser determinado con la ayuda de instrumentos construidos de la manera habitual. Supongamos que los seres de la superficie esférica S_1 (ver la Figura 15-1) construyeran un transportador recortando un disco circular y dividiendo su circunferencia en 360 partes iguales. Si se usara este transportador para medir los ángulos de un triángulo formado (como en un ejemplo anterior) por dos semimeridianos y un cuarto del ecuador, indicaría que cada ángulo mide 90 grados; por lo tanto, la suma de los tres ángulos sería de 270 grados.

El segundo punto básico que revela la consideración del mundo bidimensional es que, si hallamos indicios empíricos de un espacio no-euclidiano, podemos conservar la geometría euclidiana siempre que estemos dispuestos a introducir complicaciones en las leyes acerca de los cuerpos sólidos y de los rayos de luz. Cuando miramos superficies dentro de nuestro espacio, por ejemplo, una superficie sobre la cual

vemos caminar una hormiga, tiene sentido preguntarse si la superficie es un plano, es parte de una esfera o es de algún otro tipo. Por otra parte, si consideramos el espacio de nuestro universo, un espacio que no podemos observar como algo sumergido en un universo de mayores dimensiones, entonces carece de sentido preguntarse si el espacio es no-euclidiano o si nuestras leyes deben ser modificadas para conservar la geometría euclidiana. Las dos teorías son meramente dos descripciones de los mismos hechos. Podemos llamarlas descripciones equivalentes, porque en ambas teorías hacemos exactamente las mismas predicciones acerca de los sucesos observables. Una expresión más apropiada sería, quizás, la de "observacionalmente equivalentes". Las teorías pueden diferir considerablemente en su estructura lógica, pero si sus fórmulas y leyes conducen siempre a las mismas predicciones acerca de sucesos observables, podemos decir que son teorías equivalentes.

Al llegar a este punto, conviene distinguir claramente entre lo que queremos significar aquí por teorías equivalentes y lo que a veces se entiende por la misma expresión. Ocasionalmente, dos físicos pueden proponer dos teorías diferentes para explicar el mismo conjunto de hechos. Ambas teorías pueden explicar exitosamente este conjunto de hechos, pero pueden no ser iguales con respecto a observaciones aún no realizadas. Esto es, pueden contener predicciones diferentes acerca de lo que se observará en algún tiempo futuro. Aunque dos teorías semejantes expliquen completamente las observaciones realizadas, deben ser consideradas como teorías físicas esencialmente diferentes.

A veces, no es fácil idear experimentos que permitan optar entre dos teorías rivales que no son equivalentes. Un ejemplo clásico de esto es la teoría newtoniana de la gravitación y la teoría einsteiniana de la gravitación. Las diferencias en las predicciones de estas dos teorías son tan pequeñas que fue necesario concebir experimentos ingeniosos y realizar mediciones muy precisas antes de que fuera po-

sible establecer cuál de las teorías ofrecía mejores predicciones. Cuando Einstein propuso, más tarde, su teoría del campo unificado, afirmó que no podía imaginar ningún experimento crucial que permitiera optar entre su teoría y otras teorías. Puso en claro que su teoría no era equivalente a ninguna teoría anterior, pero estaba enunciada tan abstractamente que no podía deducir de ella ninguna consecuencia que fuera posible observar, con el grado actual de precisión de nuestros mejores instrumentos. Pero creía que si se continuaba investigando su teoría del campo unificado o si nuestros instrumentos mejoraban suficientemente, sería posible algún día realizar una observación decisiva. Es muy importante comprender que la expresión "teorías equivalentes", tal como la usamos aquí, significa algo mucho más fuerte que el hecho de que dos teorías expliquen todas las observaciones realizadas. La equivalencia es entendida aquí en el sentido de que dos teorías conducen en todos los casos a las mismas predicciones exactamente, como las teorías de los dos físicos de nuestro ejemplo.

En los dos capítulos siguientes, veremos en detalle que la concepción de Poincaré sobre la equivalencia observacional de las teorías euclidiana y no-euclidiana del espacio conduce a una comprensión más profunda de la estructura del espacio en la teoría de la relatividad.

XVI

EL ESPACIO EN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD

Según la teoría de la relatividad de Einstein, como vimos en capítulos anteriores, el espacio tiene una estructura que difiere, en los campos gravitacionales, de la estructura de la geometría euclidiana. A menos que el campo gravitacional sea muy intenso, las diferencias son difíciles de observar. El campo gravitacional de la Tierra, por ejemplo, es tan débil que ni siquiera con los mejores instrumentos disponibles es posible discernir en su vecindad diferencia alguna con respecto a la estructura euclidiana. Pero, cuando se consideran campos gravitacionales mucho más intensos, como los que rodean al Sol o a las estrellas de masas aun mayores que la del Sol, entonces es posible realizar ensayos observacionales de ciertas diferencias con respecto a la geometría euclidiana.

Los libros de divulgación sobre la teoría de la relatividad y muchos otros libros en los cuales, a veces, se examina el tema contienen declaraciones engañosas. En una página quizás declaran que, según la teoría de Einstein, la estructura del espacio en un campo gravitacional es no-euclidiana. En otra página, y a veces hasta en la misma página leemos que, de acuerdo con la teoría de la relatividad, las varas se contraen en un campo gravitacional. (No se trata del tipo de contracción llamada la contracción de Lorentz, que se relaciona con las varas en movimiento, sino de una contracción de las varas en reposo en un campo gravitacional.)

Es necesario dejar bien en claro que estas dos afirmaciones no son compatibles. No puede decirse que una de ellas sea errónea. En una de las páginas, el autor tiene razón; y

también la tiene en la otra página. Pero las dos afirmaciones no deben figurar en dos páginas del mismo capítulo. Pertenecen a lenguajes diferentes, y el autor debe decidir si prefiere hablar de la teoría de la relatividad en un lenguaje o en el otro. Si quiere hablar en un lenguaje euclidiano, es correcto decir que una vara se contrae en un campo gravitacional. Pero entonces no puede hablar también de la estructura no-euclidiana del espacio. Por otra parte, puede adoptar un lenguaje no-euclidiano; pero entonces no puede hablar de contracciones. Ambos lenguajes constituyen una manera legítima de hablar acerca de campos gravitacionales, pero mezclar los lenguajes en el mismo capítulo es provocar la confusión en el lector.

Se recordará que, en nuestro ejemplo anterior del mundo chato, imaginamos a dos físicos que sostenían teorías diferentes acerca de la naturaleza de su mundo. Se nos hizo evidente que las dos teorías eran equivalentes, en realidad, y sólo diferían en que eran dos maneras diferentes de describir la misma totalidad de los hechos. La misma situación se presenta con respecto a la teoría de la relatividad. Una descripción, a la que llamaremos T_1, es no-euclidiana. La otra, T_2, es euclidiana.

En el lenguaje de T_1, el lenguaje no-euclidiano, las leyes de la mecánica y de la óptica siguen siendo las mismas que en la física preeinsteiniana. Los cuerpos sólidos son rígidos excepto en lo que se refiere a deformaciones como las distensiones y contracciones elásticas (cuando fuerzas externas los comprimen o los estiran), las dilataciones térmicas, los cambios provocados por la magnetización, etc. Estas deformaciones constituyen una parte conocida de la física clásica y se las toma en cuenta introduciendo diversos factores de corrección en la definición de longitud. Por ejemplo, se puede decidir que una cierta vara de medir será la unidad patrón de longitud. Puesto que se sabe que la vara se dilata cuando se calienta, la vara sólo representa esta unidad de longitud cuando se encuentra a cierta temperatura "nor-

mal" T_0. Por supuesto, en algún momento dado la vara puede tener otra temperatura, T, diferente de T_0. Por lo tanto, para definir la longitud de la vara patrón a la temperatura T, es necesario multiplicar la longitud normal de la vara, l_0, por un factor de corrección, como explicamos en el Capítulo 9. En este capítulo, dimos a este factor la expresión $1 + \beta\ (T - T_0)$, donde el valor de β depende de la sustancia de la cual está hecha la vara. De este modo se llega a la definición de longitud:

$$l = l_0\,[1 + \beta(T - T_0)]$$

De manera similar, es necesario tomar en consideración otras fuerzas que puedan influir sobre la longitud de la vara, pero la gravedad no se halla entre ellas. Con respecto a la luz, el lenguaje de T_1 afirma que los rayos de luz en el vacío son siempre líneas rectas. Los campos gravitacionales no los curvan o deflectan. La descripción alternativa, T_2, conserva la geometría euclidiana. Para explicar las observaciones que sugieren la presencia de un espacio no-euclidiano, se introducen modificaciones en las leyes clásicas de la óptica y la mecánica.

Para ver cómo se aplican estas dos descripciones a la estructura de un plano en el espacio físico, tal como lo concibe la teoría de la relatividad, consideremos un plano S que pase por el centro del Sol. De acuerdo con la teoría de la relatividad, las pruebas observacionales (si son factibles) revelarían que un triángulo de este plano exterior al Sol tendría ángulos cuya suma sería menor que 180 grados. Análogamente, un círculo de este plano, exterior al Sol, tendría una razón de la circunferencia al diámetro que sería mayor que pi. Las mediciones que se realizaran en el *interior* del Sol mostrarían diferencias opuestas.

Para hacer intuitivamente más clara la estructura de este plano y ver cómo es posible describirla en los lenguajes rivales de T_1 y T_2, utilizaremos un modelo del espacio euclidiano que pueda ponerse en correspondencia biunívoca con

la estructura del plano no euclidiano que acabamos de describir. Este modelo es una superficie curva, S′, cuya construcción describiremos. [1]

En el sistema de coordenadas *R*-*Z* (ver la Figura 16-1), la curva *DBC* es un arco de parábola cuya directriz es Z. (La curva es generada por un punto que se mueve de manera tal que su distancia perpendicular a la directriz es siempre la misma que su distancia del punto *F*, el foco de la parábola.) *V* es el vértice de la parábola, y la distancia es proporcional a la masa del Sol. El arco *AB* es el arco de un círculo. Su centro, *E*, está sobre el eje Z y está ubicado de tal modo que el arco avanza suavemente sobre la parábola; esto significa que la tangente al círculo en *B* y la tangente a la parábola en *B* coinciden. (*B* es llamado un punto de inflexión de la curva *ABC*.) Supongamos que se hace rotar

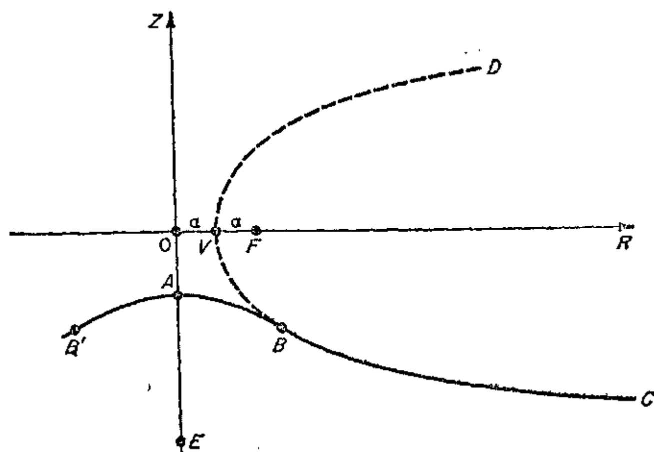


Figura 16-1.

[1] Sobre esta construcción, véase L. Flamm, *Physikalische Zeitschrift* (Leipzig), 17 (1916), 448-454, basado en Karl Schwarzschild, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlín: 1916), pp. 189-196, 424-434.

esta suave curva ABC alrededor del eje Z para generar una superficie similar a la de una colina. Esta es la superficie S' que servirá como modelo euclidiano del plano no-euclidiano que pasa por el centro del Sol.

La parte de la superficie cercana a la cumbre de la colina, $B'AB$, es esférica y convexa; corresponde a la parte del plano interior al Sol. Aquí la curvatura es constante y positiva. (Raramente se destaca esto en los libros sobre la teoría de la relatividad, porque pocos físicos se ocupan de la estructura geométrica del espacio dentro de una gran masa como la del Sol. Pero se trata de un punto teórico importante que será considerado más adelante, cuando examinemos un triángulo de rayos de luz exterior al Sol.) Fuera de esta cumbre esférica, la superficie es cóncava como la de una montura. Esta curvatura es, por supuesto, negativa; pero, a diferencia de la geometría lobachevskiana, no es constante. Lejos del centro de la colina, la parábola se asemeja cada vez más a una línea recta. La curvatura sólo es pronunciadamente diferente de cero en posiciones no lejanas de la porción esférica de la superficie. Esta parte curvada negativamente de la superficie corresponde a la parte del plano exterior al Sol. En la vecindad inmediata del Sol, su curvatura negativa difiere mucho de cero. A medida que se aleja del Sol, se aproxima a cero. Nunca llega a cero, pero en un punto suficientemente alejado es prácticamente igual a cero. En el diagrama, se exagera mucho la curvatura. Si la escala de la figura fuera más exacta, la curva sería tan semejante a una recta que no se podría determinar la curvatura. Más adelante daremos su expresión cuantitativa.

Podemos comparar ahora las teorías T_1 y T_2, la no-euclidiana y la euclidiana, y ver cómo se aplican a la estructura del plano que pasa por el centro del Sol. Lo haremos como Helmholtz, utilizando como modelo la superficie curva similar a una colina. Antes hablamos de ella como de una superficie euclidiana, pues lo es; pero ahora la usamos como modelo del plano no-euclidiano. En la Figura 16-2, S_1

es su perfil. Debajo, la línea recta S_2 representa el plano euclidiano corriente. Como antes, se proyectan todos los pun-

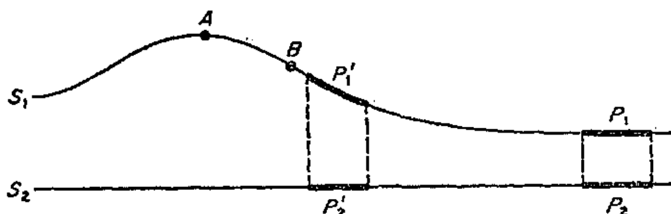


Figura 16-2.

tos de S_1, mediante líneas paralelas (las líneas punteadas de la figura), sobre S_2. Obsérvese que si se desplaza una vara de la posición P_1 a la posición P'_1, esto es, de una posición alejada del Sol a una posición muy cercana a él, la vara no se contrae, porque se describe el suceso en el lenguaje de la geometría no-euclidiana. Pero si se usa el lenguaje euclidiano de la teoría T_2, basada en el plano S_2 debe decirse que la vara se contrae al pasar de P_2 a P'_2. Es necesario agregar nuevas leyes según las cuales todas las varas, cuando se las aproxima al Sol, sufren ciertas contracciones en la dirección radial, la dirección hacia el centro del Sol.

La Figura 16-3 muestra la situación tal como se la ve desde arriba, y no en un corte transversal. El círculo de centro A es el Sol. La vara está en la posición P. Sea ϕ el



Figura 16-3.

ángulo entre la vara y la dirección radial. En términos de la teoría T_2, la contracción de la vara depende de este ángulo y se la puede someter a una ley general. Esta ley declara que si se lleva (sin cambio en la temperatura y otras condiciones) una vara de longitud l_0 cuando está lejos de un campo gravitacional, a una posición P a la distancia r del cuerpo b, cuya masa es m, que forma un ángulo ϕ con la dirección radial, la vara se contraerá y adquirirá la longitud:

$$l_0[1 - C(\frac{m}{r}\cos^2\phi)],$$

donde C es cierta constante. Puesto que esta es una ley general, como la ley de la dilatación térmica, debe ser tomada en consideración cuando se define una vara de medir que será usada como patrón de longitud. Por lo tanto, debe insertarse un nuevo término de corrección en la ecuación utilizada anteriormente para definir la longitud l. La definición, entonces, será:

$$l = l_0\,[1 + \beta(T - T_0)]\ [1 - C(\frac{m}{r}\cos^2\phi)].$$

Mantengamos constante la distancia r, pero hagamos variar el ángulo ϕ. Si la vara está en una dirección radial, de modo que $\phi = 0$, entonces el coseno es 1 y "$\cos^2\phi$" puede ser omitido de la ecuación. En este caso, la contracción alcanza su valor máximo. Si ϕ es un ángulo recto, el coseno es 0, y desaparece íntegro el término de corrección. En otras palabras, no hay contracción de la vara cuando está situada perpendicularmente a la dirección radial. En otras posiciones, la contracción varía entre 0 y el máximo.

El valor de la constante C es muy pequeño. Si se miden todas las magnitudes en el sistema *CGS* (centímetro, gramo, segundo), entonces el valor de C es $3{,}7 \times 10^{-29}$. Esto significa que después de la coma decimal hay 28 ceros seguidos por "37". Es evidente, pues, que se trata de un valor suma-

mente pequeño. Aun si la masa es tan grande como la del Sol (1,98 x 10^{33} gramos) y si r se reduce todo lo posible mediante una cercanía tan estrecha a la superficie del Sol que r sea igual al radio AB del Sol (6,95 x 10^{10} centímetros), el efecto es también muy pequeño. En realidad, la contracción relativa de una vara cerca de la superficie del Sol, en la dirección radial, es:

$$C\,\frac{m}{r_0} = 0{,}0000011.$$

Es evidente, pues, que los gráficos de las Figuras 16-1 y 16-2 son enormemente exagerados. La estructura de un plano que pasa por el centro del Sol es prácticamente la misma que la de un plano euclidiano; pero hay diferencias pequeñísimas y, como veremos más adelante, hay procedimientos experimentales para observarlas.

El punto importante que es menester captar aquí —el punto destacado por Poincaré— es que la conducta de las varas en campos gravitacionales puede ser descripta de dos maneras esencialmente diferentes. Puede conservarse la geometría euclidiana si introducimos nuevas leyes físicas, o puede conservarse la rigidez de los cuerpos si adoptamos una geometría no-euclidiana. Somos libres de elegir la geometría que nos plazca para el espacio físico, siempre que estemos dispuestos a introducir los ajustes necesarios en las leyes físicas. Este ajuste no sólo se aplica a las leyes concernientes a los cuerpos físicos, sino también a las leyes ópticas.

Puede comprenderse fácilmente la aplicación a las leyes ópticas si consideramos el camino de un rayo de luz que pasa cerca del Sol, en su trayectoria a partir de una estrella alejada de la Tierra. En la Figura 16-4 se muestra la Tierra a la izquierda y el disco del Sol en el centro. Cuando el Sol no está en la posición indicada, la luz proveniente de la estrella E (a la derecha del dibujo) normalmente llegará a

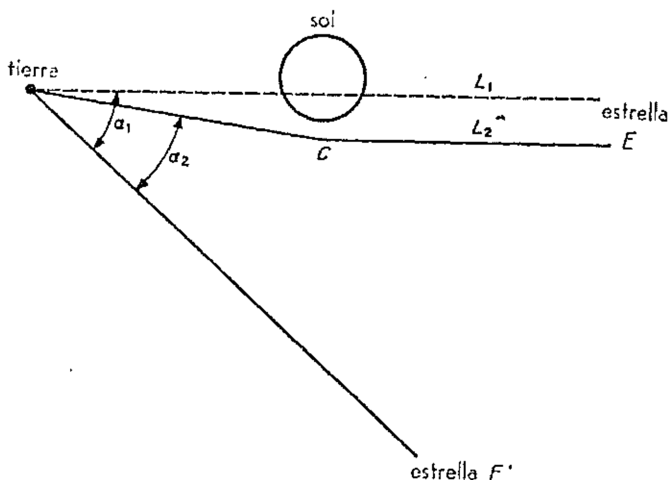


Figura 16-4.

la Tierra a lo largo de la recta L_1. Pero cuando el Sol está en la posición indicada, la luz de la estrella se desvía en C y sigue el camino L_2. La estrella E está tan lejos que las trayectorias luminosas L_1 y L_2 (a la derecha del punto C) pueden ser consideradas paralelas. Pero si un astrónomo midiera el ángulo α_2 entre la estrella E y otra estrella E', hallaría que es levemente menor que el ángulo α_1, hallado en otras épocas del año, cuando el Sol no aparece cerca de la estrella E. Así, la posición de la estrella E, tal como se la ve desde la tierra, parece haberse desplazado ligeramente hacia la estrella E'. Se trata, por supuesto, de una observación empírica que constituye, realmente, una de las confirmaciones empíricas básicas de la teoría de Einstein.

La luz solar es tan intensa que las estrellas cercanas al nimbo solar sólo pueden ser vistas o fotografiadas durante un eclipse de Sol. Una parte de tal fotografía presenta un aspecto semejante al del dibujo de la Figura 16-5. La posi-

ción de la estrella E está indicada por un punto. Se indican otras estrellas, inclusive la estrella E', mediante otros puntos. El ángulo formado por los rayos de luz provenientes de E

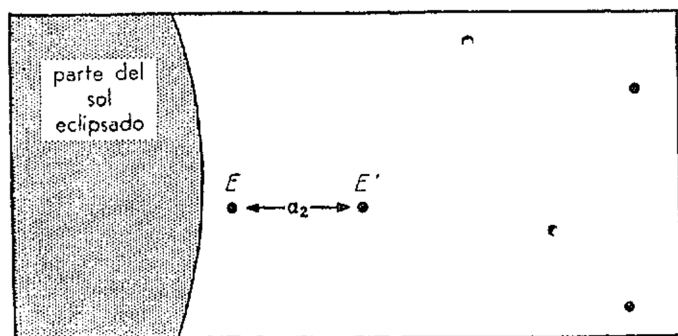


Figura 16-5.

y E' se determina midiendo la distancia entre E y E' en la placa fotográfica. Luego, se compara esta distancia con la que presentan las dos estrellas en fotografías tomadas en otras épocas del año, cuando el Sol se encontraba en otras posiciones. Las pruebas históricas de este tipo, realizadas por primera vez en 1919 y repetidas en muchos eclipses posteriores, indicaban una desviación muy pequeña de las posiciones de estrellas cercanas al disco del Sol. Los desplazamientos confirmaron la predicción de Einstein de que los rayos de luz que pasaran cerca del Sol se "curvarían" debido al poderoso campo gravitacional del astro.

Las primeras mediciones de esos desplazamientos fueron realizadas por Findlay Freundlich en la Torre de Einstein de Potsdam, cerca de Berlín. Por aquel entonces, yo vivía en Viena y recuerdo que estaba visitando a Hans Reichenbach en Berlín; fuimos ambos a ver a Freundlich al sótano de la torre, donde estaba trabajando. Éste pasó muchos días haciendo cálculos cuidadosos de todas las posiciones de las

estrellas sobre una placa fotográfica de 25 cm^2. Con ayuda de un microscopio, hacía repetidas mediciones de las coordenadas de cada estrella y luego tomaba el promedio de estas mediciones para obtener la estimación más exacta posible de la posición de la estrella. No permitía a ninguno de sus ayudantes que hiciera estas mediciones; las efectuaba él mismo porque comprendía la gran importancia histórica de la prueba. Resultó que era posible detectar el desplazamiento, aunque era muy pequeño, y la prueba fue una espectacular confirmación de la teoría de Einstein.

La deflexión de los rayos de luz por un campo gravitacional es similar a la contracción aparente de los cuerpos físicos. También en este caso, debemos elegir entre dos teorías que explican los resultados empíricos. En la teoría T_2, conservamos la geometría euclidiana; pero entonces, tenemos que elaborar nuevas leyes ópticas que describan la deflexión de la luz en campos gravitacionales. Por otra parte, en la teoría T_1 adoptamos una geometría no-euclidiana y conservamos la suposición clásica de que, en el vacío, la luz no es deflectada por los campos gravitacionales. Explicaremos esto en el próximo capítulo.

Es importante comprender cabalmente la naturaleza de esta elección antes de preguntar cuál es la estructura geométrica del espacio. Creo que la ambigüedad de esta pregunta y la formulación elíptica de diversas respuestas, de Poincaré y de otros, condujo a ciertas interpretaciones equivocadas de su posición (por ejemplo, por parte de Reichenbach). Poincaré decía que el físico puede elegir libremente entre una geometría euclidiana y cualquier tipo de geometría no-euclidiana. Como Poincaré afirmaba que la elección era materia de convención, su punto de vista recibió el nombre de "convencionalismo". En mi opinión, Poincaré quería decir que la elección la hacía el físico *antes* de decidir cuál método usar para medir longitudes. Después de hecha la elección, *ajustaría* su método de medición para que condujera al tipo de geometría que había elegido. Una vez acep-

tado un método de medición, la cuestión de la estructura del espacio se convierte en una cuestión empírica que debe ser dirimida por las observaciones. Aunque Poincaré no siempre hacía explícito esto, sus escritos, tomados en su contexto total, indican que era esto lo que quería significar. En mi opinión, no hay diferencia alguna entre Reichenbach y Poincaré en lo concerniente a esta cuestión. Es cierto que Reichenbach criticó a Poincaré por ser un convencionalista que no vio el aspecto empírico de la cuestión concerniente a la estructura geométrica del espacio, pero Poincaré hablaba elípticamente; sólo se refería a la adopción inicial de una geometría por el físico. Ambos pensadores vieron claramente que, una vez adoptado un método de medición adecuado, la cuestión de la estructura geométrica del espacio se convierte en un problema empírico y debe ser resuelto mediante observaciones.

El aspecto empírico de este problema queda claramente de manifiesto si se formula una interesante pregunta raramente planteada en la actualidad, pero que fue muy discutida en los primeros años de la teoría de la relatividad. ¿El espacio total del universo es finito o infinito? Como dijimos antes, Einstein propuso un modelo del cosmos que puede ser considerado como análogo a la superficie de una esfera. Para los seres bidimensionales de una esfera, la superficie sería finita e ilimitada. Sería finita porque podría explorarse toda la superficie y podría calcularse su área; pero sería ilimitada en el sentido de que se podría avanzar siempre en cualquier dirección y desde cualquier posición, sin encontrar nunca un límite de ninguna clase. En el modelo de Einstein, el espacio tridimensional, contemplado desde un punto de vista tetradimensional, poseería una curvatura total positiva, de modo que se cerraría sobre sí mismo como la superficie cerrada de una esfera. Una nave espacial que viajara en cualquier dirección en "línea recta" con el tiempo volvería a su punto de partida, así un aeroplano que se moviera a lo largo de un círculo máximo de la tierra retornaría

a su punto de partida. Hasta se especuló que sería posible ver una galaxia si se apuntara un telescopio poderoso en la dirección opuesta a la de la galaxia.

¿Cómo podía Einstein asignar a todo el cosmos una curvatura positiva cuando sostenía, al mismo tiempo, que en los campos gravitacionales había siempre una curvatura negativa? Si se le hace esta pregunta a un físico se le puede provocar un buen dolor de cabeza. La respuesta no es difícil, pero la pregunta puede ser desconcertante si no se ha dedicado mucha reflexión a esas cuestiones. Consideremos la superficie de la tierra. Tiene una curvatura general positiva. Sin embargo, está llena de valles que tienen pronunciadas curvaturas negativas. Del mismo modo, el modelo cósmico de Einstein contiene "valles" de curvatura negativa en los campos gravitacionales intensos, pero ellos están contrabalanceados por curvaturas positivas aun más pronunciadas *dentro* de las grandes masas, como las estrellas fijas. Estas estrellas corresponden, en la analogía con la superficie terrestre a las marcadas curvaturas positivas de las cúpulas montañosas. Se ha calculado que el cosmos tendría una curvatura total positiva sólo si su densidad media de masa fuera suficientemente elevada. En la actualidad, la hipótesis de la expansión del universo y los cálculos recientes acerca de la cantidad de materia que hay en el universo han hecho muy improbable el modelo finito y cerrado de Einstein. Quizás es aún una cuestión sin resolver, porque hay mucha incertidumbre en las mediciones de masas y de distancias. Es posible que el hidrógeno esté esparcido por todo lo que antes se consideraba vacío; esto elevaría la densidad media de masa del cosmos. Sea como fuere, la atractiva imagen de Einstein de un universo cerrado pero ilimitado ciertamente parece menos probable en la actualidad que en la época en la cual la propuso. Lo que debemos destacar aquí es que los elementos de juicio en favor o en contra de este modelo cósmico son elementos de juicio empíricos. Por el momento, aunque es general la aceptación

de la geometría no-euclidiana que postula la teoría de la relatividad, no hay ningún modelo cósmico sobre el cual estén de acuerdo todos los astrónomos y los físicos.

Como hemos visto, los físicos podían haber conservado la geometría euclidiana (como Poincaré predijo erróneamente que harían) y podían haber explicado las nuevas observaciones introduciendo nuevos factores de corrección en las leyes mecánicas y ópticas. Pero prefirieron seguir a Einstein en su abandono de la geometría euclidiana. ¿Cuál es la base sobre la que tomaron esta decisión? ¿Fue por razones de simplicidad? Si es así, ¿para simplificar qué? El enfoque euclidiano tiene una geometría mucho más simple pero leyes físicas mucho más complicadas. El enfoque no-euclidiano tiene una geometría considerablemente más complicada, pero leyes físicas muy simplificadas. ¿Cómo adoptar una decisión con respecto a los dos enfoques, cada uno de los cuales es más simple que el otro en algún aspecto? En el capítulo siguiente trataremos de responder a esta cuestión.

XVII

VENTAJAS DE LA GEOMETRÍA FÍSICA NO-EUCLIDIANA

Al buscar una base sobre la cual fundar la elección entre una estructura geométrica euclidiana y otra no-euclidiana para el espacio físico, al principio se experimenta la tentación de elegir el enfoque que suministra el método más simple para medir longitudes. En otras palabras, evitar en todo lo posible, la introducción de factores de corrección en los métodos de medición. Infortunadamente, si se toma al pie de la letra esta regla, las consecuencias son fantásticas. La manera más simple de medir longitudes es adoptar una vara de medir y definir la unidad de longitud como la longitud de esta vara, sin introducir para nada factores de corrección. Se toma como unidad de longitud la vara, independientemente de su temperatura, independientemente de que esté imanada o de quo actúen sobre ellas fuerzas elásticas e independientemente de que se encuentre en un campo gravitacional fuerte o débil. Como indicamos antes, no hay ninguna contradicción lógica en la adopción de tal unidad de longitud; ni hay manera alguna por la cual esta elección pueda ser impedida por los hechos observados. Pero el precio que es menester pagar por tal elección es elevado; conduce a un cuadro extraño e increíblemente complicado del mundo. Sería necesario afirmar, por ejemplo, que cuando se coloca la vara en una llama, todos los otros objetos del cosmos, inclusive las galaxias más distantes, inmediatamente se contraen. Ningún físico aceptaría las consecuencias y las complejas leyes físicas que resultarían de la adopción de esta definición, la más simple posible, de longitud.

¿Cuál es, pues, la base sobre la cual Einstein y sus seguidores eligieron la geometría no-euclidiana, más compleja? La respuesta es que no hicieron la elección con respecto a la simplicidad de este o aquel aspecto parcial, sino más bien con respecto a la simplicidad de conjunto del sistema total de la física que resultaría de esa elección. Desde este punto de vista global, ciertamente, debemos coincidir con Einstein en que se gana en simplicidad si se adopta la geometría no-euclidiana. Para conservar la geometría euclidiana, la física tendría que idear fantasmagóricas leyes acerca de la contracción y dilatación de los cuerpos sólidos y de la deflexión de los rayos de luz en campos gravitacionales. Una vez que se adoptó el enfoque *no-euclidiano*, hubo una enorme simplificación de las leyes físicas. En primer lugar, ya no es necesario introducir nuevas leyes para la contracción de los cuerpos rígidos y la deflexión de los rayos de luz. Más aun, se simplifican mucho las viejas leyes que gobiernan los movimientos de los cuerpos físicos, como los movimientos de los planetas alrededor del sol. Hasta la misma fuerza gravitacional, en cierto sentido, desaparece del cuadro. En lugar de una "fuerza", queda solamente el movimiento de un objeto a lo largo de su "línea mundial" natural,

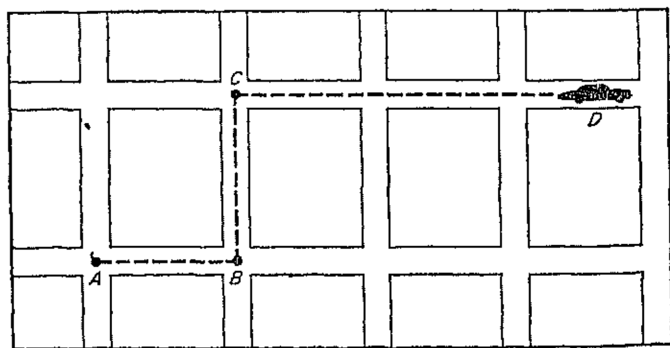


Figura-17-1.

según los requisitos de la geometría no-euclidiana del sistema espaciotemporal.

Podemos explicar el concepto de línea mundial de la manera siguiente. Supongamos que el lector quiere diagramar en un mapa, M, el movimiento de su automóvil por las calles de Los Ángeles. La Figura 17-1 muestra tal mapa; la línea $ABCD$ indica el camino del auto. La línea muestra exactamente cómo el auto atravesó las calles, pero, por supuesto, no dice nada acerca de la velocidad del auto. El elemento tiempo está ausente.

¿Cómo puede diagramarse el movimiento del auto de modo que estén representados el tiempo y la velocidad del automóvil? Se lo puede hacer tomando una serie de mapas, M_1, M_2,..., cada uno de ellos dibujado sobre una lámina transparente de material plástico, como muestra la Figura 17-2. En M_1 marcamos el punto A_1 (correspondiente a A en el mapa original M), donde el automóvil se encontraba en el primer punto temporal, T_1. En M_2 marcamos la posi-

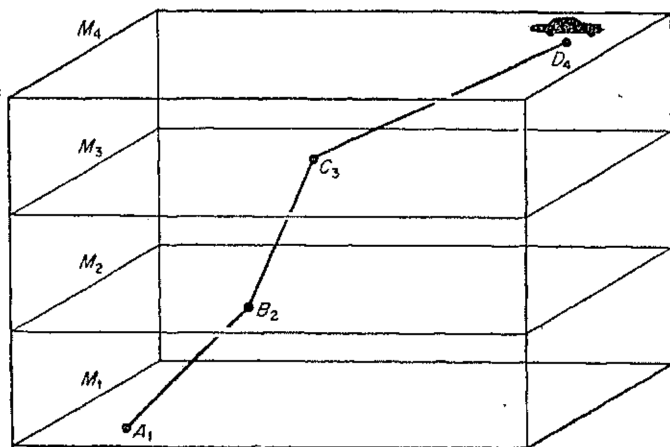


Figura 17-2.

ción B_2 del automóvil en un punto temporal posterior, T_2 (por ejemplo, 20 segundos después de T_1). M_3 y M_4 muestran las posiciones C_3 y D_4 del automóvil en los puntos temporales T_3 y T_4. Se colocan los mapas en un armazón que los mantiene paralelos, uno encima del otro, a distancias de 20 centímetros, por ejemplo; se utiliza una escala vertical de 1 centímetro por cada segundo de tiempo. Si se coloca un alambre para unir los cuatro puntos, el alambre representará la *línea mundial* del movimiento del automóvil. Además de indicar dónde estaba el automóvil en cada momento, indica la velocidad del automóvil al pasar de un punto a otro.

Un ejemplo aun más simple de línea mundial se obtiene cuando se indica el camino unidimensional de un automóvil conducido a lo largo de la avenida Wilshire. Se podría trazar una línea mundial en este caso como lo indica la Figura 17-3, donde el eje horizontal indica la distancia y el eje vertical el tiempo en minutos. El automóvil parte en

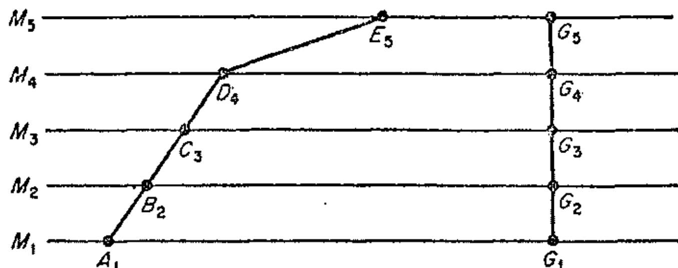


Figura 17-3.

el tiempo M_1 de la posición A_1. En los tres primeros minutos, el automóvil se desplaza a velocidad constante de A_1 a D_4. De D_4 a E_5 la velocidad del auto es constante, pero es mayor que antes porque recorre una distancia mayor en un minuto. A la derecha de este gráfico se muestra la línea mundial de un hombre que permaneció en el mismo lugar,

G, durante los cuatro minutos. Puesto que no se movió, su línea mundial es recta y vertical. Es evidente que una línea mundial, en este gráfico, se aparta cada vez más de la vertical a medida que aumenta la velocidad. Si la velocidad no es constante, entonces la línea mundial es curva, no recta. De esta manera, la línea indica todas las características del movimiento real; aunque la velocidad del objeto aumente o disminuya, la línea mundial muestra su velocidad en cada instante.

La línea mundial de un objeto sólo puede ser diagramada sobre un plano si el objeto se mueve a lo largo de un camino unidimensional. Si el camino es bidimensional, como en el primer ejemplo, es necesario diagramar la línea mundial en el gráfico tridimensional. Análogamente, la línea mundial de un objeto que se mueva en el espacio tridimensional debe ser representada en una serie de mapas tridimensionales que constituyen un sistema tetradimensional, del mismo modo que la serie de mapas plásticos bidimensionales formaban un sistema tridimensional. No se puede construir un modelo real de un gráfico tetradimensional que contenga una línea mundial tetradimensional, pero es posible describir matemáticamente la línea mundial. Una métrica especial introducida por Hermann Minkowski conduce a una fórmula notablemente simple. Cuando se la aplica a las leyes relativas a los rayos de luz y los cuerpos en movimiento, como los planetas, las líneas mundiales de los planetas y los rayos de luz, en todos los campos gravitacionales, resultan ser geodésicas. Como se explicó antes, una geodésica es la línea "más recta" posible de un sistema espacial dado. Este sistema no necesita tener una curvatura constante. Sobre la superficie de la Tierra, por ejemplo, con sus montañas y valles irregulares, siempre es posible hallar una o más geodésicas que representen los caminos más cortos posibles entre dos puntos dados. Las geodésicas son los equivalentes de las rectas del plano euclidiano.

En la teoría de la relatividad, las líneas mundiales de

planetas y rayos de luz son geodésicas. Al igual que en la física clásica, se dice que un cuerpo sobre el cual no actúa una fuerza externa se mueve por su inercia a lo largo de una trayectoria recta a velocidad constante y, por lo tanto, a lo largo de una línea mundial recta; es decir, en la física de la relatividad, se dice que este cuerpo se mueve, aun en campos gravitacionales, a lo largo de líneas mundiales que son geodésicas. En este cuadro no es necesario ningún concepto de "fuerza". ¿Por qué un planeta gira alrededor del Sol en lugar de alejarse por una tangente? No es porque el Sol ejerza una "fuerza" que "atraiga" al planeta hacia él, sino porque la masa del Sol crea una curvatura negativa en la estructura no-euclidiana de espacio-tiempo. En la estructura curva, la línea mundial más recta del planeta, su geodésica, resulta ser la que corresponde a su movimiento real alrededor del Sol. La trayectoria elíptica del planeta no es una geodésica en el espacio tridimensional sino que es su línea mundial, en el sistema de espacio-tiempo tetradimensional no-euclidiano, la que coincide con una geodésica. Es la línea más recta posible que el planeta puede seguir. De manera similar, la luz también se propaga por el espacio-tiempo a lo largo de líneas mundiales geodésicas.

Desde el punto de vista no-euclidiano de la teoría de la relatividad, no hay ninguna fuerza de gravedad, en el sentido de una acción de fuerzas elásticas o electromagnéticas. La gravitación, como fuerza, desaparece de la física y es reemplazada por la estructura geométrica de un sistema de espacio-tiempo tetradimensional. Se trata de una trasformación tan revolucionaria que no es difícil comprender que muchos no lograran captar correctamente el concepto. Se decía a veces que una parte de la física, a saber, la teoría de la gravitación, había sido reemplazada por la geometría pura o que parte de la física se había convertido en matemática. Algunos autores especulaban sobre la posibilidad de que algún día toda la física se convirtiera en matemática. Creo que esto es engañoso. Los autores que

tratan de hacer más clara la teoría de la relatividad para el lego gozan utilizando expresiones paradójicas y estimulantes. Tales expresiones pueden dar más colorido a la exposición, pero a menudo dejan una impresión inexacta acerca de lo que sucede realmente. En este caso, creo que conducen a una confusión entre la geometría en el sentido matemático y la geometría en el sentido físico. La física de la gravitación realmente es reemplazada, en la teoría de la relatividad, por una geometría física del espacio o, más exactamente, del sistema de espacio-tiempo. Pero esta geometría aún forma parte de la física, no de la matemática pura. Es geometría *física*, no matemática.

La geometría matemática es puramente lógica, mientras que la geometría física es una teoría empírica. En la teoría de la relatividad de Einstein, la gravitación simplemente adopta otra forma. Una teoría física de la gravedad es sustituida por otra teoría física. El concepto de fuerza desaparece, pero la teoría relativista de la gravitación aún es física, no matemática. En ella siguen apareciendo magnitudes no matemáticas (las distribuciones de la curvatura de espacio-tiempo). Se trata de magnitudes físicas, no de conceptos matemáticos. Lo que debemos destacar aquí es que, como a la teoría de la gravitación de Einstein se la llamó geometría, hubo una propensión a considerarla como si fuera matemática pura. Pero la geometría física no es matemática; es una teoría del espacio físico. No es una abstracción vacía. Es la teoría física sobre la conducta de los cuerpos y los rayos de luz, por lo cual no se la puede considerar como parte de la matemática pura. Ya hemos dicho antes que es necesario tomar *cum grano salis* la famosa observación de Galileo de que el libro de la naturaleza está escrito en el lenguaje de la matemática. Es fácil interpretar equivocadamente esta observación. Galileo quería decir que es posible describir la naturaleza con ayuda de conceptos matemáticos, no que el lenguaje total de la física consistiera en símbolos matemáticos. Es absolutamente imposible de-

finir conceptos como el de "masa" o el de "temperatura" en la matemática pura de la misma manera que es posible definir el concepto de logaritmo o cualquier otra función matemática. Es esencial comprender que existe una diferencia fundamental entre los símbolos físicos que aparecen en una ley física (por ejemplo,"*m*" por masa, "*T*" por temperatura) y los símbolos matemáticos que aparecen en la misma ley (por ejemplo, "2", "$\sqrt{}$", "log", "cos").

La gran simplicidad de las ecuaciones de Einstein para los cuerpos en movimiento y los rayos de luz es, ciertamente, un argumento en favor de su afirmación de que es preferible el enfoque no-euclidiano al euclidiano, en el cual sería necesario complicar las ecuaciones introduciendo nuevos factores de corrección. Pero aún estamos lejos del descubrimiento de cualquier tipo de principio general que enseñe a obtener la mayor simplicidad total al elegir entre enfoques alternativos de la física. Lo que se busca es una regla general de elección que pueda aplicarse en todas las situaciones futuras; la elección de Einstein en esta situación sería, entonces, un caso especial de la regla general. Se da por supuesto, naturalmente, que es preferible el sistema físico más simple globalmente, pero esta no es la cuestión. La cuestión consiste en cómo decidir cuál de dos sistemas tiene la máxima simplicidad global. Cuando hay dos sistemas globales, sucede a menudo que cada uno de ellos sea más simple que el otro en algún aspecto. En tales casos, ¿cómo es posible medir la simplicidad total?

El mérito de haber propuesto una regla general de este tipo corresponde a Riechenbach. Quizás su regla no es absolutamente general, pero abarca una clase amplia de situaciones y es muy interesante. Creo que no se le ha prestado suficiente atención. La regla se basa en una distinción entre "fuerzas diferenciales" y "fuerzas universales". Reichenbach las llamaba "fuerzas", pero aquí es preferible hablar de ellas, de una manera más general, como de dos tipos de "efectos" (las fuerzas pueden ser introducidas luego, para

explicar los efectos). La distinción es la siguiente: si un efecto es diferente con respecto a sustancias diferentes, es un *efecto diferencial.* Si es cuantitativamente el mismo, independientemente de la naturaleza de la sustancia, es un *efecto universal.*

Podemos aclarar lo anterior mediante ejemplos. Cuando se calienta una vara de hierro, se dilata. Si se define la longitud por medio de una vara de hierro, este efecto de dilatación térmica es tomado en consideración (como vimos antes) introduciendo un factor de corrección:

$$l = l_0 \, [1 + \beta(T - T_0)].$$

La beta de esta fórmula es el coeficiente de dilatación térmica. Es una constante, pero sólo para todos los cuerpos de una misma sustancia. Si la vara es de hierro, beta tiene determinado valor; si es de cobre, de oro o de cualquier otra sustancia, tiene valores diferentes. La dilatación de la vara al calentarse es, por lo tanto, un efecto diferencial, evidentemente, porque varía según la sustancia.

Consideremos la fórmula de la longitud después de introducir un segundo factor de corrección que toma en consideración la influencia de la gravitación sobre la longitud de la vara. La fórmula, como se recordará, es la siguiente:

$$l = l_0 \, [1 + \beta \, (T - T_0)] \, [1 - C \, (\frac{m}{r} \cos^2 \phi)].$$

La C de este segundo factor de corrección es una constante universal; es la misma para todo campo gravitacional y para cualquier cuerpo. No hay ningún parámetro dentro del par de corchetes de la derecha que cambie de una sustancia a otra, a la manera del parámetro beta. El factor de corrección toma en consideración la masa m del Sol, la distancia r entre el Sol y la vara de medir y el ángulo de la vara con respecto a una línea radical que una al Sol con la vara. No indica nada acerca de si la vara es de hierro, de cobre o de alguna otra sustancia. Por lo tanto, es un efecto universal.

Reichenbach a veces agregaba que los efectos universales son de tal suerte que no es posible formar escudos de protección contra ellos. Una vara metálica, por ejemplo, puede ser protegida de los efectos térmicos rodeándola de una pared de hierro. Pero no hay ninguna manera de protegerla contra los efectos gravitacionales. En mi opinión, no es necesario hablar de escudos de protección para distinguir entre efectos diferenciales y efectos universales, porque esta condición ya está implícita en lo que hemos dicho antes. Si se construye una pared de hierro para proteger un aparato de un poderoso imán ubicado en la habitación contigua, la protección es efectiva sólo porque la pared de hierro recibe de distinta manera que el aire la influencia de los campos magnéticos. Si no fuera así, la protección no serviría. El concepto de protección, pues, sólo se aplica a los efectos que tienen influencias diferentes sobre diferentes sustancias. Si se define un efecto universal como aquel que es igual para todas las sustancias, se desprende de esto que no es posible construir ninguna protección contra dicho efecto.

En un detallado análisis de los efectos diferenciales y universales [1], Reichenbach llama la atención especialmente sobre el hecho siguiente. Supongamos que alguien declara haber descubierto un nuevo efecto y afirma que éste no varía de una sustancia a otra. La ley que formula para este nuevo efecto es examinada, y del examen surge que es verdad la afirmación anterior: la ley no contiene ningún parámetro que varíe según la naturaleza de la sustancia. En los casos de este tipo, sostenía Reichenbach, siempre es posible reformular la teoría de modo que el efecto universal desaparezca completamente.

No hay ninguna manera semejante de eliminar un efecto diferencial como el de la dilatación térmica. La afirmación

[1] Ver el Capítulo 6, "The Distinction between Universal and Differential Forces", de la obra de Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time* (Nueva York: Dover, 1958).

de que no hay efectos de dilatación térmica puede ser refutada fácilmente. Colóquense dos varas de diferentes sustancias una junto a la otra, caliénteselas a la misma temperatura elevada y obsérvese la diferencia resultante en las longitudes. Evidentemente, algo ha cambiado y no hay manera de explicar esta diferencia observable sin introducir el concepto de dilatación térmica. Por otra parte, un efecto universal como la influencia de la gravedad sobre las longitudes de las varas *puede* ser explicado adoptando una teoría en la cual el efecto desaparezca totalmente. Esto es exactamente lo que sucede en la teoría de la relatividad. La adopción de un sistema de espacio-tiempo no-euclidiano adecuado elimina la necesidad de hablar de la dilatación y la contracción de los cuerpos en campos gravitacionales. Los cuerpos no alteran sus tamaños cuando se mueven por estos campos; pero en esta teoría hay una estructura diferente de espacio-tiempo. A diferencia del caso anterior con respecto a la dilatación térmica, no hay ninguna manera de demostrar que la eliminación de este efecto gravitacional es imposible. Los campos gravitacionales tienen exactamente el mismo efecto sobre todas las sustancias. Si se colocan dos varas una junto a otra y se las orienta en diversas direcciones conservan exactamente la misma longitud una con respecto a la otra.

Dadas estas consideraciones, Reichenbach propuso la siguiente regla para simplificar la teoría física: toda vez que en un sistema de física una ley afirme un determinado efecto universal y especifique en qué condiciones y en qué medida aparece el efecto, la teoría debe ser transformada de modo tal que la cantidad del efecto se reduzca a cero. Esto es lo que Einstein hizo con respecto a la contracción y dilatación de los cuerpos en campos gravitacionales. Desde el punto de vista euclidiano, tales cambios se producen, pero son efectos universales. La adopción del sistema de espacio-tiempo no-euclidiano hace que estos efectos se anulen. Pueden aparecer otros efectos, por ejemplo, que los ángulos

de un triángulo ya no sumen 180º, pero no es necesario hablar de las dilataciones y contracciones de los cuerpos rígidos. Cuando se encuentran efectos universales en la física, sostenía Reichenbach, siempre es posible eliminarlos mediante una adecuada transformación de la teoría; y es necesario realizar esta transformación porque de este modo se gana en simplicidad total. Se trata de un principio general útil, que merece más atención de la que ha recibido. No sólo se aplica a la teoría de la relatividad, sino también a situaciones que puedan surgir en el futuro con respecto al descubrimiento de otros efectos universales. Sin la adopción de esta regla, no hay manera de dar una respuesta única a la pregunta: ¿cuál es la estructura del espacio? Si se adopta la regla, esta pregunta ya no es ambigua.

Cuando Einstein propuso por primera vez la adopción de una geometría no-euclidiana para el espacio, se plantearon fuertes objeciones. Ya hemos mencionado la objeción de Dingler y otros, según la cual la geometría euclidiana es indispensable porque se la presupone ya en la construcción de los instrumentos de medida; pero, como hemos visto, esta objeción es equivocada. Una objeción más común, desde un punto de vista más filosófico, fue que no se debe adoptar la geometría no-euclidiana porque es imposible de imaginar. Es contraria a nuestras maneras de pensar, a nuestra intuición. A veces se expresaba esta objeción de una manera kantiana, a veces de una manera fenomenológica (difería la terminología), pero, en general, el argumento central era que nuestras mentes parecen trabajar de modo que no podemos visualizar ninguna estructura espacial no-euclidiana.

El argumento anterior también fue analizado por Reichenbach.[2] Creo que tiene razón al considerarlo un problema psicológico y al decir que no hay ninguna base para suponer que nuestras intuiciones pueden estar preformadas de una manera euclidiana. Por el contrario, hay excelentes

[2] Idem, Capítulos 9-11.

razones para creer que el espacio visual, al menos el espacio visual de un niño, es no-euclidiano. La "intuición espacial", como se la llama, no es tanto una intuición de una estructura métrica como una intuición de una estructura topológica. Nuestra percepción nos dice que el espacio es tridimensional y continuo, y que todo punto tiene las mismas propiedades topológicas que cualquier otro punto. Pero, con respecto a las propiedades métricas del espacio, nuestras intuiciones son guías vagas e inexactas.

Un indicio del carácter no-euclidiano de la percepción del espacio es la sorprendente capacidad de la mente de ajustarse a cualquier tipo de imagen que aparezca en la retina. Una persona con un fuerte astigmatismo, por ejemplo, registrará imágenes muy deformadas en la retina de cada ojo. Sus imágenes retinales de una vara de medir pueden ser más largas cuando la contempla horizontalmente que cuando la contempla verticalmente, pero ella ignora esto, porque las longitudes de todos los objetos se alteran de igual forma en su campo visual. Cuando esta persona se coloca anteojos correctores, su campo visual aparecerá deformado durante muchos días o semanas hasta que su cerebro se adapte a las imágenes normales de su retina. Análogamente, una persona con vista normal puede usar anteojos especiales que deforman las imágenes a lo largo de una coordenada; después de un tiempo, se acostumbra a las nuevas imágenes y su campo visual aparece normal. Helmholtz describió experimentos de este tipo y llevó a cabo algunos de ellos, de los cuales concluyó que el espacio visual puede tener una estructura no-euclidiana. Helmholtz creía —y yo pienso que se pueden esgrimir buenos argumentos en favor de esta creencia— que si se condicionara suficientemente a un niño o hasta a un adulto a experiencias relativas a la conducta de los cuerpos en un mundo no-euclidiano, podría visualizar la estructura no-euclidiana con la misma facilidad con que podemos visualizar la estructura euclidiana.

Aun cuando esta creencia de Helmholtz sea infundada,

hay un argumento más importante contra la objeción de que no se debe adoptar la geometría no-euclidiana porque es imposible imaginarla. La capacidad de visualización es una cuestión psicológica totalmente ajena a la física. La construcción de una teoría física no está limitada por el poder de visualización del hombre; de hecho, la física moderna se ha apartado constantemente de lo que puede ser observado e imaginado directamente. Aun cuando la teoría de la relatividad contuviera diferencias mucho mayores con respecto a la intuición y resultara que nuestra intuición espacial tiene una permanente e inalterable parcialidad euclidiana, podríamos usar en la física cualquier estructura geométrica que nos plazca.

Durante el siglo XIX, en Inglaterra más que en el Continente, hubo en la física firmes esfuerzos para lograr la visualización y la construcción de modelos. Se representaba al éter como una extraña especie de sustancia trasparente y gelatinosa capaz de oscilar y trasmitir ondas electromagnéticas. A medida que la física progresó, este modelo del éter se hizo cada vez más complicado y hasta adquirió propiedades que parecían incompatibles. Por ejemplo, debía concebirse al éter como totalmente desprovisto de densidad, porque no ofrecía ninguna resistencia observable a los movimientos de los planetas y los satélites; pero se halló que las ondas luminosas son transversales, no longitudinales, hecho que correspondía más a cuerpos de densidad sumamente *elevada.* Aunque estas propiedades no eran lógicamente incompatibles, hacían muy difícil la elaboración de un modelo del éter intuitivamente satisfactorio. Con el tiempo, los diversos modelos del éter se hicieron tan complejos que ya no servían para nada. Por esta razón, Einstein consideró que era mejor abandonar totalmente el éter. Era más simple aceptar las ecuaciones de Maxwell y de Lorentz, y hacer cálculos con ellas, en lugar de intentar la construcción de un modelo tan extraño que ya no servía de nada en la visualización de la estructura del espacio.

No sólo se abandonó el éter. La tendencia del siglo XIX a construir modelos visuales se debilitó cada vez más a medida que progresaba la física del siglo XX. Las nuevas teorías eran tan abstractas que se las debía aceptar totalmente en sus propios términos. Las funciones psi, que representan los estados de un sistema físico como un átomo, son demasiado complicadas para permitir la construcción de modelos que puedan ser visualizados fácilmente. Por supuesto, un profesor o un autor de temas científicos con habilidad expositiva a menudo usará un diagrama para ayudar a comprender algunos aspectos de una teoría abstrusa. No hay ninguna objeción contra el uso de tales diagramas como auxiliares de la enseñanza. El punto que es necesario destacar es que decir de una nueva teoría física que es más difícil de visualizar que una vieja no es una objeción válida contra la primera. De este tipo, exactamente, era la objeción que se planteaba a menudo contra la teoría de la relatividad, cuando se la propuso por vez primera. Recuerdo una ocasión, en 1930, en la cual yo discutía sobre la relatividad con un físico alemán, en Praga. Se sentía sumamente deprimido.

"Esto es terrible, dijo. ¡Mire lo que Einstein ha hecho de nuestra maravillosa física!"

"¿Terrible?", respondí. Yo estaba entusiasmado con la nueva física. Con unos pocos principios generales que describían cierto tipo de invariancia y la estimulante adopción de una geometría no-euclidiana, podían explicarse muchas cosas que antes eran ininteligibles. Pero este físico tenía una resistencia emocional tan fuerte contra las teorías difíciles de visualizar que había perdido su entusiasmo por la física a causa de los revolucionarios cambios de Einstein. Lo único que lo mantenía era la esperanza de que algún día —que él deseaba, fuera durante su vida— un líder contrarrevolucionario restaurara el viejo orden clásico, en el cual pudiera respirar confortablemente y sentirse nuevamente en su hogar.

Una revolución semejante se produjo en la física atómica.

Durante muchos años, fue placentero y satisfactorio disponer del modelo del átomo elaborado por Niels Bohr: una especie de sistema planetario con un núcleo en el centro y los electrones girando a su alrededor en órbitas. Pero resultó ser una simplificación excesiva. El físico nuclear de hoy no trata de elaborar un modelo total. Si utiliza un modelo, sabe siempre que sólo refleja ciertos aspectos de la situación y deja afuera otros. Ya no se exige que el sistema total de la física sea tal que sea posible visualizar claramente todas las partes de su estructura. Esta es la razón fundamental por la cual la afirmación psicológica de que no es posible visualizar la geometría no-euclidiana, aunque fuera verdadera (y en mi opinión es dudosa), no es una objeción válida contra la adopción de un sistema físico no-euclidiano.

Un físico debe siempre cuidarse de tomar un modelo visual como algo más que un recurso pedagógico o una ayuda provisional. Al mismo tiempo, también debe permanecer alerta a la posibilidad de que un modelo visual pueda resultar literalmente exacto, como sucede a veces. En ocasiones, la naturaleza depara tales sorpresas. Muchos años antes de que la física elaborase nociones claras acerca de cómo los átomos se unen para formar moléculas, se acostumbraba a efectuar cuadros esquemáticos de la estructura molecular. Se indicaban los átomos de una sustancia mediante letras mayúsculas y se trazaban líneas de valencias para conectarlos de diversas maneras. Recuerdo una conversación con un químico que se oponía, por entonces, a tales diagramas. "Pero, ¿no son de gran ayuda?", le pregunté. Y me respondió: "Sí, pero debemos advertir a nuestros estudiantes que no tomen esos diagramas como si representaran configuraciones espaciales reales. No sabemos absolutamente nada acerca de la estructura espacial en el nivel molecular. Esos diagramas no son más que diagramas, como la curva de un gráfico que ilustra un aumento de población o la producción de hierro en lingotes. Todos sabemos que esa curva sólo es una metáfora. La población o el hierro en lingotes no

sube en ningún sentido espacial. Los cuadros moleculares deben ser concebidos de la misma manera. Nadie sabe qué tipo de estructura espacial real tienen las moléculas."

Me manifesté de acuerdo con el químico, pero sostuve que existía la posibilidad, al menos, de que las moléculas pudieran estar vinculadas de la manera indicada por los diagramas, especialmente si se tenía en cuenta el hecho de que se habían descubierto los estereoisómeros, que hacían conveniente concebir a una molécula como la imagen especular de otra. Si un tipo de azúcar desvía la luz polarizada en el sentido de las agujas del reloj y otro tipo de azúcar la desvía en el sentido contrario, esto parece indicar algún tipo de configuración espacial de los átomos en las moléculas, configuraciones que pueden tener formas dextrógiras o levógiras.

"Es cierto", me respondió. "Pero no sabemos con seguridad si esto es así."

El químico tenía razón. Por aquel entonces, se sabía tan poco acerca de la estructura molecular que hubiera sido prematuro insistir en que, a medida que aumentara el conocimiento de tal estructura, seguiría siendo posible representar las moléculas mediante modelos tridimensionales visualizables. Era concebible que las observaciones ulteriores exigieran estructuras de cuatro, cinco o seis dimensiones. Los diagramas no eran más que imágenes convenientes de lo que se sabía por entonces.

Pero pronto resultó, particularmente después de la determinación por Max von Laue de las estructuras de los cristales mediante la difracción de rayos X, que los átomos de los compuestos moleculares *están*, en realidad, situados espacialmente de la manera que indica el diagrama estructural. Actualmente, un químico no vacila en afirmar que, en una molécula de proteína, hay ciertos átomos aquí y otros allí, y que todos ellos forman una hélice. Los modelos que muestran los vínculos de los átomos en el espacio tridimensional son tomados muy literalmente. No se ha encontrado ningún

indicio que permita ponerlos en duda, y hay excelentes razones para pensar que los modelos tridimensionales de las moléculas representan configuraciones reales en el espacio tridimensional. Una sorpresa semejante se produjo, más recientemente, como consecuencia de los experimentos que mostraron que la paridad no se conserva en las interacciones nucleares débiles. Parece ahora que las partículas y las antipartículas, consideradas hasta ahora como imágenes especulares sólo en un sentido metafórico, pueden realmente ser imágenes especulares en un sentido espacial.

Por ello, la advertencia contra la consideración literal de tales modelos, aunque correcta en principio, puede luego ser innecesaria. Una teoría puede abandonar modelos que sea posible visualizar; luego, en una fase posterior, al aumentar el conocimiento puede volver a los modelos visuales de los que antes dudó. En el caso de los modelos moleculares, eran principalmente los físicos quienes dudaban. La representación de los átomos como ordenados espacialmente en las moléculas es tan conveniente que la mayoría de los químicos tomaban los modelos literalmente, aunque los físicos sostenían, correctamente, que aún no estaban suficientemente justificados.

Es necesario no confundir los modelos como estructuras espaciales visuales con los modelos en el sentido matemático moderno de la palabra. En la actualidad, los matemáticos, lógicos y científicos hablan de modelos cuando se refieren a una estructura conceptual abstracta, no a algo que se pueda construir en el laboratorio con bolas y alambres. El modelo puede ser solamente una ecuación o un conjunto de ecuaciones. Es una descripción simplificada de una estructura —física, económica, sociológica o de otro tipo— en la cual los conceptos abstractos pueden ser relacionados en forma matemática. Es una descripción simplificada porque deja de lado muchos factores que complicarían el modelo, si se los incluyera. El economista, por ejemplo, utiliza un modelo para la economía de mercado libre, otro para la eco-

nomía planificada, etc. El psicólogo utiliza un modelo matemático del proceso de aprendizaje, de las relaciones entre un estado psicológico y otro, con ciertas probabilidades de transición que constituyen la serie llamada por los matemáticos una cadena de Markov. Estos modelos son muy diferentes de los de la física del siglo XIX. El propósito que se persigue al construirlos no es visualizar, sino formalizar. El modelo es puramente hipotético. Se colocan en él ciertos parámetros y se los ajusta hasta lograr la mejor adecuación con los datos. A medida que se realizan más observaciones, puede resultar que los parámetros no solamente deban ser ajustados aun más, sino también que sea necesario cambiar las ecuaciones básicas. En otras palabras, se modifica el modelo mismo. El viejo modelo rindió sus servicios durante un tiempo; pero luego se necesita un nuevo modelo.

El modelo físico del siglo XIX no era un modelo en este sentido abstracto. Se lo destinaba a ser un modelo espacial de una estructura espacial, de igual modo que el modelo de un barco o un avión representa a un barco o un avión real. Por supuesto, el químico no piensa que las moléculas están formadas por pequeñas bolillas coloradas unidas mediante alambres; hay muchos aspectos de este modelo que no deben ser tomados literalmente. Pero, en su configuración espacial general, se lo considera como un cuadro correcto de la configuración espacial de los átomos de la molécula real. Como hemos señalado, a veces hay buenas razones para tomar tal modelo literalmente, por ejemplo, un modelo del sistema solar o el de un cristal o molécula. Aunque no haya base para tal interpretación, los modelos visuales pueden ser sumamente útiles. La mente trabaja intuitivamente y, a menudo, el científico encuentra útil pensar con ayuda de representaciones visuales. Pero al mismo tiempo, es menester tener siempre conciencia de las limitaciones de un modelo. La construcción de un modelo visual claro no es ninguna garantía de la corrección de una teoría, así como la falta de un modelo visual no basta para rechazar la teoría.

XVIII

LA SÍNTESIS A PRIORI DE KANT

¿Puede el conocimiento ser al mismo tiempo sintético y a priori? Esta famosa pregunta fue planteada por Immanuel Kant y respondida por él mismo en sentido afirmativo. Es importante comprender exactamente el significado que asignaba Kant a esta pregunta y por qué los empiristas contemporáneos disienten de su respuesta.

La pregunta de Kant supone dos importantes distinciones: una distinción entre *analítico* y *sintético* y otra entre *a priori* y *a posteriori*. Se han dado diversas interpretaciones de ambas distinciones. En mi oponión, la primera es lógica y la segunda es epistemológica.

Consideremos en primer lugar la distinción lógica. La lógica se ocupa exclusivamente de la verdad o falsedad de un enunciado sobre la base de los significados atribuidos a los términos del enunciado. Por ejemplo, definamos el término "perro" de la manera siguiente: "*X* es un perro si y sólo si *X* es un animal que tiene ciertas características." Ser un animal, pues, forma parte del significado del término "perro". Si, sobre la base de esta estipulación, se enuncia la afirmación "todos los perros son animales", esto sería lo que Kant llamaba un juicio analítico. No supone nada más que las relaciones de significación entre los términos. Kant no lo expresaba con estas palabras, pero esto es, esencialmente, lo que quería significar. Por otra parte, un enunciado sintético, por ejemplo, "la Luna gira alrededor de la Tierra", tiene un contenido fáctico. Como la mayoría de los enunciados científicos, es sintético porque va más allá de los significados de los términos. Nos dice algo sobre la naturaleza del mundo.

La distinción entre *a priori* y *a posteriori* es una distinción epistemológica entre dos tipos de conocimiento. Kant entendía por *a priori* el tipo de conocimiento que es independiente de la experiencia, pero no independiente en un sentido genético o psicológico. Era plenamente consciente de que todo conocimiento humano depende de la experiencia en un sentido genético. Sin la experiencia, obviamente, no habría conocimiento de ninguna especie. Pero ciertos tipos de conocimiento reciben apoyo de la experiencia de una manera que no es válida para otros tipos. Consideremos, por ejemplo, el enunciado analítico, "todos los perros son animales". No es necesario observar perros para hacer esta afirmación; en realidad, ni siquiera es necesario que existan perros. Sólo es necesario poder concebir algo como un perro, que haya sido definido de modo tal que ser un animal forme parte de la definición. Todos los enunciados analíticos son *a priori* en este sentido. No es necesario referirse a la experiencia para justificarlos. Es cierto que nuestra experiencia con perros puede habernos llevado a concluir que los perros son animales. En un sentido amplio de la palabra experiencia, todo lo que conocemos se basa en la experiencia. Pero el punto importante es que nunca es necesario referirse a la experiencia para justificar la verdad de un enunciado analítico. No debe afirmarse: "Ayer, examiné algunos perros y algunos objetos que no son perros; luego examiné algunos animales y algunos objetos que no son animales; finalmente, sobre la base de esta investigación, llegué a la conclusión de que todos los perros son animales." Por el contrario, se justifica el enunciado "todos los perros son animales" señalando que, en nuestro lenguaje, se entiende el término "perro" en un sentido que incluye "ser un animal". Se lo justifica de la misma manera que la verdad analítica del enunciado "un unicornio tiene un solo cuerno sobre su cabeza". Los significados de los términos implican la verdad del enunciado, sin referencia a ningún examen del mundo.

En cambio, los enunciados *a posteriori* son aserciones que

no pueden ser justificadas sin referencia a la experiencia. Consideremos por ejemplo, el enunciado según el cual la Luna gira alrededor de la Tierra. No se puede justificar su verdad citando el significado de términos tales como "Luna", "Tierra" y "gira alrededor". Literalmente, por supuesto, "*a priori*" y "*a posteriori*" significan "anterior" y "posterior", pero Kant dejaba totalmente en claro que no entendía esto en un sentido temporal. No quería decir que, en el conocimiento *a posteriori*, la experiencia haya aparecido *antes* de que se adquiriera el conocimiento; en este sentido, por supuesto, la experiencia es anterior a *todo* conocimiento. Kant quería significar que la experiencia es una *razón* esencial para afirmar un conocimiento *a posteriori*. Sin ciertas experiencias específicas (en el caso de la revolución de la Luna alrededor de la Tierra, estas experiencias son diversas observaciones astronómicas) no es posible justificar un enunciado *a posteriori*. En un sentido aproximado, el conocimiento *a posteriori* hoy recibe el nombre de conocimiento empírico; es un conocimiento que depende esencialmente de la experiencia. El conocimiento *a priori* es independiente de la experiencia.

Como dijimos antes, todos los enunciados analíticos son, evidentemente, *a priori*. Pero ahora se plantea una cuestión importante. ¿La línea divisoria entre lo *a priori* y lo *a posteriori* coincide con la línea divisoria entre lo analítico y lo sintético? Si las dos líneas coinciden, se puede adoptar el diagrama de la figura 18-1. Pero quizás los límites no coin-

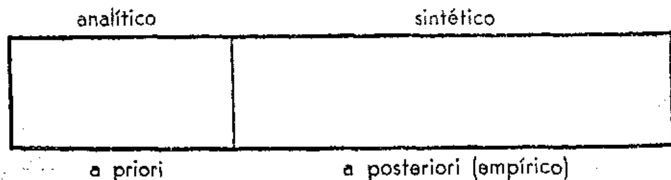


Figura 18-1.

ciden. La línea divisoria entre lo *a priori* y lo *a posteriori* no puede estar a la izquierda de la línea que separa lo analítico de lo sintético (porque todos los enunciados analíticos son también *a priori*), pero puede estar a la derecha como se indica en la Figura 18-2. Si es así, entonces, hay una región intermedia en la cual lo sintético se superpone con lo *a priori.*

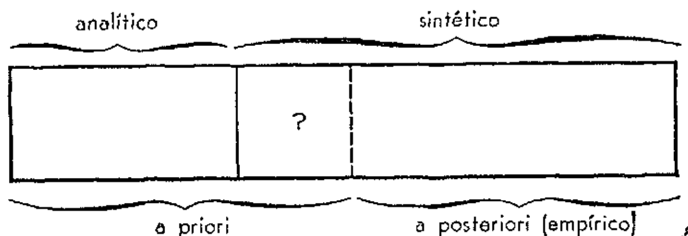


Figura 18-2.

Esta es la concepción de Kant. Hay un ámbito del conocimiento, sostenía, que es al mismo tiempo sintético y *a priori*. Es sintético porque dice algo acerca del mundo, y es *a priori* porque se lo puede saber con certidumbre, de una manera que no requiere justificación por la experiencia. ¿Existe tal región? Esta es una de las grandes cuestiones controvertidas que han surgido en la historia de la filosofía de la ciencia. Como señaló una vez Moritz Schlick, en verdad el empirismo puede ser definido como el punto de vista según el cual lo sintético *a priori* no existe. Si es posible reducir todo el empirismo a una fórmula, esta es la única manera de hacerlo.

La geometría proveyó a Kant con uno de sus principales ejemplos de conocimiento sintético *a priori*. Su razonamiento era que si se consideran los axiomas de la geometría (por lo cual entendía la geometría euclidiana, ya que en su época no se conocía otra), no es posible imaginar que los axiomas

no sean verdaderos. Por ejemplo, hay una y sólo una línea recta entre dos puntos. La intuición, en este ámbito, nos da la certeza absoluta. Es posible imaginar una línea recta que una dos puntos, pero toda otra línea que se conciba pasando por ellos debe ser curva, no recta. Por lo tanto, argüía Kant, tenemos derecho a abrigar completa confianza en el conocimiento de todos los axiomas de la geometría. Puesto que los teoremas derivan todos lógicamente de los axiomas, también estamos autorizados a tener completa confianza en la verdad de los teoremas. La geometría, pues, es absolutamente cierta, de una manera que no requiere justificación por la experiencia. No es necesario hacer puntos sobre una hoja de papel y trazar varias líneas para establecer el enunciado de que sólo habrá una línea recta que una dos puntos cualesquiera. Se lo justifica por la intuición, y si bien un teorema geométrico puede ser muy complicado y en modo alguno obvio, se lo puede justificar partiendo de los axiomas y recorriendo una serie de pasos lógicos que son también intuitivamente ciertos. En resumen, toda la geometría es *a priori*.

Por otra parte, continuaba Kant, los teoremas de la geometría nos dicen algo acerca del mundo. Consideremos el teorema de que la suma de los ángulos interiores de un triángulo es igual a 180 grados. Es posible derivarlo lógicamente de los axiomas euclidianos, de modo que hay un conocimiento *a priori* de su verdad. Pero también es cierto que, si se traza un triángulo y se miden sus ángulos, se encuentra que suman 180 grados. Si la suma difiere de esta cantidad, un examen más cuidadoso de la construcción revelará siempre que las líneas no son perfectamente rectas o que, quizás, las mediciones son inexactas. Los teoremas de la geometría, pues, son algo más que enunciados *a priori*. Describen la estructura real del mundo y, por ende, son también sintéticos. Sin embargo, es evidente que no son *a posteriori* del mismo modo que lo son las leyes científicas. Una ley científica tiene que ser justificada por la experien-

cia. Es fácil imaginar que mañana pueda observarse un suceso que contradiga una ley científica determinada. Es fácil suponer que la Tierra pueda girar alrededor de la Luna, y nunca podemos estar seguros de que la ciencia no hará mañana descubrimientos que exijan la modificación de lo que antes se suponía verdadero. Pero no sucede esto con las leyes geométricas. Es inconcebible que nuevos descubrimientos geométricos modifiquen la verdad del teorema de Pitágoras. La geometría euclidiana es intuitivamente cierta, independientemente de la experiencia. Kant estaba convencido de que tenemos en la geometría un paradigma de la unión del conocimiento sintético y *a priori*.

Desde un punto de vista moderno, la situación presenta un aspecto muy diferente. No se le debe reprochar a Kant su error porque, en su época, aún no se había descubierto la geometría no-euclidiana. Él no podía concebir la geometría de otra manera. De hecho, durante todo el siglo XIX, excepto unos pocos hombres audaces, como Gauss, Riemann y Helmholtz, hasta los matemáticos adoptaban este punto de vista kantiano. En la actualidad, es fácil ver la fuente del error de Kant. Consistía en no darse cuenta de que hay dos tipos esencialmente diferentes de geometría: una matemática y otra física.

La geometría matemática es matemática pura. En términos kantianos es al mismo tiempo analítica y *a priori*. Pero no es posible decir que es también sintética. Es simplemente un sistema deductivo basado en ciertos axiomas que no deben ser interpretados con referencia a algo existente en el mundo. Se puede demostrar esta afirmación de muchas maneras diferentes, una de las cuales la ofrece Bertrand Russell en su libro *The Principles of Mathematics* (que no debe ser confundido con la obra posterior *Principia Mathematica*).[1]

[1] Ver la Parte VI de *The Principles of Mathematics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1903; segunda ed., con una nueva introducción, Londres: Allen & Unwin, 1938; Nueva York: Norton, 1938).

Russell muestra que es posible definir totalmente el espacio euclidiano como un sistema de relaciones primitivas para las cuales se postulan ciertas propiedades estructurales; por ejemplo, una relación es simétrica y transitiva, otra es asimétrica, etc. Sobre la base de estas postulaciones es posible deducir lógicamente un conjunto de teoremas para el espacio euclidiano, teoremas que abarcan toda la geometría euclidiana. Esta geometría no dice nada acerca del mundo. Sólo dice que, si un sistema de relaciones tiene ciertas propiedades estructurales, el sistema tendrá otras características que se desprenden lógicamente de la estructura postulada. La geometría matemática es una teoría de estructura lógica. Es completamente independiente de las investigaciones científicas empíricas; sólo se ocupa de las implicaciones lógicas de un conjunto dado de axiomas.

La geometría física, por otra parte, se ocupa de la aplicación de la geometría pura al mundo. En ella, los términos de la geometría euclidiana tienen su significado corriente. Un punto es una posición real en el espacio físico. Por supuesto, no podemos observar un punto geométrico, pero podemos aproximarnos a él haciendo, por ejemplo, un puntito sobre una hoja de papel. Análogamente, podemos observar y trabajar con aproximaciones a líneas, planos, cubos, etc. Estas palabras se refieren a estructuras reales del espacio físico que habitamos, y forman parte también del lenguaje de la geometría pura o matemática; esta es una fuente primordial de la confusión reinante en el siglo XIX acerca de la geometría. Como los científicos empíricos y los matemáticos puros usaban las mismas palabras, se supuso erróneamente que unos y otros utilizaban el mismo tipo de geometría.

La distinción entre las dos geometrías se hizo especialmente clara gracias a la famosa obra de David Hilbert sobre los fundamentos de la geometría.[2] "Pensamos aquí en

[2] Los *Grundlagen der Geometrie* ("Fundamentos de la Geometría") de Hilbert aparecieron en Alemania en 1899. Open Court (1902) pu-

tres sistemas diferentes de objetos", escribía Hilbert. "A los objetos del primer sistema los llamamos *puntos*, a los del segundo sistema los llamamos *líneas* y a los del tercer sistema, *planos*." Aunque aplicaba a estas entidades los nombres de "puntos", "líneas" y "planos", no aludía para nada a los significados de estas palabras. Eran convenientes sólo porque eran familiares y suministraban al lector una visualización de una posible interpretación de los términos. Pero el sistema geométrico, tal como Hilbert lo construyó, estaba totalmente exento de toda interpretación. "Puntos", "líneas" y "planos" podían ser entendidos como aludiendo a tres clases cualesquiera de entidades que satisficieran las relaciones enunciadas en los axiomas. Por ejemplo, en lugar de puntos, líneas y planos físicos, se puede interpretar "punto" como una terna ordenada de números reales; una "línea" sería, entonces, una clase de ternas ordenadas de números reales que satisfacen a una ecuación lineal; y un "plano" sería una clase de ternas ordenadas que satisfacen a dos ecuaciones lineales. En la geometría pura o matemática, los términos como "punto", "líneas" y "planos" no se usan en el sentido ordinario. Tienen una infinidad de interpretaciones posibles.

Una vez que se comprende esta distinción entre la geometría pura y la geometría física, se hace evidente que la creencia de Kant, como la creencia de casi todos los filósofos del siglo XIX, supone una confusión fundamental entre dos ámbitos de carácter muy diferente. Cuando decimos "la geometría es, ciertamente, *a priori*; no hay ninguna duda acerca de la verdad de sus teoremas", estamos pensando en la geometría matemática. Pero supóngase que añadimos: "También nos dice algo acerca del mundo. Con su ayuda podemos predecir el resultado de mediciones realizadas en estructuras geométricas reales." Inadvertidamente, nos hemos deslizado aquí hacia el otro significado de "geometría". Estamos ha-

blicó en Chicago una traducción inglesa debida a E. J. Townsend que puede encontrarse en una edición en rústica.

blando de la geometría física, de la estructura del espacio real. La geometría matemática es *a priori*. La geometría física es sintética. Ninguna geometría es ambas cosas al mismo tiempo. En realidad, si se acepta el empirismo, no hay conocimiento que sea *a priori* y sintético simultáneamente.

Con referencia al conocimiento geométrico, la distinción entre los dos tipos de geometría es fundamental y, en la actualidad, es universalmente reconocida. Cuando alguien hace una afirmación acerca de la naturaleza del conocimiento geométrico, lo primero que se debe preguntar es: "¿A qué tipo de geometría se refiere usted? ¿Está usted hablando de la geometría matemática o de la geometría física?" Es esencial hacer aquí una clara distinción, para evitar la confusión y para comprender los revolucionarios avances de la teoría de la relatividad.

Einstein dio una de las formulaciones más claras y más precisas de esta distinción al final de una conferencia titulada "Geometría y experiencia".[3] Einstein hablaba de las "matemáticas", pero aludía a la geometría en los dos sentidos en los que se la puede entender. Decía: "En la medida en que los teoremas de las matemáticas se refieren a la realidad, no tienen certeza." En la terminología kantiana, esto significa que, en la medida en que son sintéticos, no son *a priori*. Y continuaba: "Y en la medida en que poseen certeza, no se refieren a la realidad." En la terminología kantiana, en la medida en que son *a priori*, no son sintéticos.

Kant sostenía que el conocimiento *a priori* tiene certeza; la experiencia no puede contradecirlo. La teoría de la relatividad puso en claro para todos los que la entendieron que, si se toma la geometría en este sentido *a priori*, no nos dice nada acerca de la realidad. No es posible formular ningún enunciado que combine la certeza lógica con el conocimiento de la estructura geométrica del mundo.

[3] La conferencia de Einstein fue publicada separadamente con el título de *Geometrie und Erfahrung* (Berlín: 1921); luego fue traducida al inglés e incluida en la obra de Albert Einstein, *Sidelights on Relativity* (Nueva York: Dutton, 1923).

CUARTA PARTE

CAUSALIDAD Y DETERMINISMO

XIX

LA CAUSALIDAD

El concepto de causalidad, uno de los temas centrales de la actual filosofía de la ciencia, ha concentrado la atención de filósofos distinguidos desde la época de los antiguos griegos hasta el presente. En épocas anteriores, se lo consideraba una parte de la llamada filosofía de la naturaleza. Este campo abarcaba tanto la investigación empírica de la naturaleza como la clarificación filosófica de este conocimiento. En la actualidad, resulta cada vez más claro que la investigación de la naturaleza es tarea del científico empírico, no del filósofo como tal.

Por supuesto, un filósofo puede ser también un científico. Si este es el caso, debe ser consciente de una diferencia fundamental entre dos tipos de cuestiones que puede plantear. Si plantea cuestiones tales como: "¿cómo se formaron los cráteres de la Luna?" o "¿existe alguna galaxia compuesta de antimateria?", hace preguntas que deben responder los astrónomos y los físicos. Por otra parte, si plantea cuestiones relativas, no a la naturaleza del mundo, sino al análisis de los conceptos fundamentales de una ciencia, entonces formula cuestiones pertenecientes a la filosofía de la ciencia.

En épocas anteriores, los filósofos creían que había una metafísica de la naturaleza, un campo del conocimiento más profundo y más importante que cualquier ciencia empírica. La tarea del filósofo era ofrecer verdades metafísicas. Los actuales filósofos de la ciencia no creen que exista tal metafísica. La vieja filosofía de la naturaleza ha sido reemplazada por la filosofía de la ciencia. Esta filosofía más nueva no se ocupa del descubrimiento de hechos y leyes (que es

la tarea del científico empírico), ni de la formulación de una metafísica acerca del mundo. En cambio, dirige su atención hacia la ciencia misma, estudia sus conceptos, sus métodos, sus posibles resultados, las formas de enunciados y los tipos de lógica aplicables a ella. En otras palabras, se ocupa del tipo de problemas examinados en este libro. El filósofo de la ciencia estudia los fundamentos filosóficos (esto es, lógicos y metodológicos) de la psicología, no "la naturaleza de la mente". Estudia los fundamentos filosóficos de la antropología, no la "naturaleza de la cultura". Dentro de cada campo, se ocupa de los conceptos y métodos propios de este campo.

Algunos filósofos han prevenido contra el riesgo de trazar una distinción demasiado tajante entre la labor de los científicos en un campo determinado y la labor de un filósofo de la ciencia que se ocupa de este mismo campo. En cierto sentido, esta advertencia es buena. Aunque siempre sea necesario distinguir la labor del científico empírico de la del filósofo de la ciencia, en la práctica habitualmente las dos se confunden. Un físico activo constantemente se enfrenta con cuestiones metodológicas. ¿Qué tipo de conceptos debe usar? ¿Qué reglas gobiernan estos conceptos? ¿Mediante cuál método lógico puede definir sus conceptos? ¿Cómo puede unir los conceptos en enunciados y éstos en un sistema, o teoría, lógicamente conexo? Debe plantearse todos estos interrogantes como filósofo de la ciencia; evidentemente, no se los puede responder apelando a procedimientos empíricos. Por otra parte, es imposible realizar una labor importante en la filosofía de la ciencia sin conocer muy bien los resultados empíricos de la ciencia. En este libro, por ejemplo, ha sido necesario hablar extensamente acerca de algunos aspectos particulares de la teoría de la relatividad. No hemos examinado aquí otros detalles porque nos referimos principalmente a dicha teoría para aclarar la importante distinción entre geometría empírica y geometría pura o matemática. A menos que el estudioso de la filosofía

de la ciencia comprenda cabalmente una ciencia, no puede siquiera plantear cuestiones importantes acerca de sus conceptos y métodos.

La razón por la cual he diferenciado la tarea del filósofo de la ciencia de la tarea metafísica de su predecesor, el filósofo de la naturaleza, es que esta distinción tiene importancia para el análisis de la causalidad, que es el tema de este capítulo. Los filósofos de otras épocas se ocupaban de la naturaleza metafísica de la causalidad misma. Aquí nos ocuparemos de estudiar cómo los científicos empíricos utilizan el concepto de causalidad para aclarar de manera precisa qué quieren decir cuando afirman: "esto es la causa de aquello". ¿Qué significa exactamente la relación entre causa y efecto? En la vida cotidiana, este concepto, ciertamente, es vago. Aun en la ciencia a menudo no es muy claro lo que un científico quiere decir cuando afirma que un suceso ha "causado" otro suceso. Una de las tareas más importantes de la filosofía de la ciencia es analizar el concepto de causalidad y aclarar su significado.

Hasta el origen histórico del concepto es un poco vago. Aparentemente, surgió como una especie de proyección de la experiencia humana sobre el mundo de la naturaleza. Cuando se empuja una mesa, se experimenta una tensión en los músculos. Cuando se observa algo similar en la naturaleza, por ejemplo, cuando una bola de billar choca con otra, es fácil imaginar que una de las bolas sufre una experiencia análoga a la nuestra cuando empujamos la mesa. La bola que golpea a la otra es el agente. Le *hace* algo a la otra bola y provoca su movimiento. Es fácil comprender que los hombres de las culturas primitivas supusieran que los elementos de la naturaleza estaban animados, como lo estaban ellos mismos, por almas movidas por el deseo de que sucedieran ciertas cosas. Esto es especialmente comprensible con respecto a los fenómenos naturales que provocan grandes daños. Se reprochaba a una montaña que provocara un derrumbe, a un tornado que destruyera una aldea.

En la actualidad, los hombres civilizados y, por cierto, los científicos ya no adhieren a este enfoque antropomórfico de la naturaleza. Sin embargo, persisten residuos de pensamiento animista. Una piedra destroza una ventana. ¿Pretendía la piedra hacer esto? Por supuesto que no, responderá el científico. Una piedra es una piedra. No posee ningún alma capaz de tener intenciones. Por otra parte, la mayoría de las personas, inclusive el científico mismo, no vacilará en decir que el suceso *b*, la ruptura de la ventana, fue *causado* por el suceso *a*, el choque de la piedra con el vidrio. ¿Qué quiere decir el científico cuando afirma que el suceso *b* fue causado por el suceso *a*? Podría decir que el suceso *a* "provocó" o "produjo" el suceso *b*. Como vemos, cuando trata de explicar el significado de "causa", recurre a expresiones como "efectuar", "provocar", "crear" y "producir". Son expresiones metafóricas, tomadas de las actividades humanas. Una actividad humana puede, en un sentido literal, provocar, crear y producir diversos sucesos; pero en el caso de la piedra, no se puede tomar literalmente estas expresiones. No constituyen una respuesta muy satisfactoria a la pregunta: "¿qué significa decir que un suceso causa otro?"

Es importante analizar este vago concepto de causalidad, para purificarlo de todos los viejos componentes no científicos que puedan estar asociados a él. Pero ante todo, debemos aclarar un punto: no creo que haya razón alguna para rechazar el concepto de causalidad. Algunos filósofos sostienen que David Hume, en su famosa crítica de la causalidad, pretendió rechazar el concepto *in toto*. No creo que esta fuera la intención de Hume. No pretendía rechazar el concepto, sino solamente purificarlo. Más adelante consideraremos nuevamente esta cuestión, pero sostengo desde ya que el rechazo de Hume estaba dirigido al componente de necesidad en el concepto de causalidad. Su análisis apuntaba en la dirección correcta, si bien no iba suficientemente lejos, en la opinión de los actuales filósofos de la ciencia, ni era suficientemente claro. En mi opinión, no es necesario

considerar la causalidad como un concepto precientífico, metafísico en un sentido peyorativo y que, por lo tanto, sea menester descartar. Después de que hayamos analizado y elucidado plenamente este concepto, hallaremos que queda algo a lo cual se puede llamar causalidad; este remanente justifica que se haya usado tal concepto durante siglos, tanto entre los científicos como en la vida cotidiana.

Comenzamos el análisis preguntando: ¿cuáles son los tipos de entidades entre los cuales rige la relación causal? Hablando estrictamente, lo que causa un suceso no es una *cosa,* sino un proceso. En la vida cotidiana, decimos que ciertas cosas causan sucesos. Lo que queremos significar realmente es que ciertos procesos o sucesos causan otros procesos o sucesos. Decimos que el sol causa el crecimiento de las plantas. Lo que queremos significar realmente es que la causa es la radiación del sol, un proceso. Pero si hacemos de los "procesos" o "sucesos" las entidades que intervienen en las relaciones de causa y efecto, debemos definir esos términos de una manera sumamente amplia. Debemos incluir procesos estáticos, cosa que *no* hacemos en la vida cotidiana.

Consideremos una mesa, por ejemplo. No puedo observar en ella ningún cambio. Ayer quizás se la movió y en el futuro quizás se la dañe o destruya, pero por el momento no observo ningún cambio. Puede suponerse que su temperatura, su masa y hasta la reflexión de la luz sobre su superficie permanecen inmutables durante un cierto período. Este suceso, la mesa existente sin cambio, también es un proceso. Es un proceso estático, un proceso en el cual las magnitudes de importancia permanecen constantes en el tiempo. Si se habla de procesos o sucesos como implicados en las relaciones de causa y efecto, debe reconocerse que estos términos incluyen procesos estáticos; representan una secuencia de estados de un sistema físico, tanto cambiantes como no cambiantes.

A menudo, hay ocasiones en las cuales se dice que ciertas *circunstancias* o *condiciones* son causas o efectos. Es una

manera admisible de hablar; no hay ningún peligro de que se tome a los términos en un sentido demasiado estrecho, porque una condición estática o constante también es una condición. Supongamos que investigamos la causa de un choque de dos autos en una ruta. No sólo debemos estudiar las condiciones cambiantes, por ejemplo, los movimientos de los automóviles, las actitudes de los conductores, etc., sino también las condiciones que eran constantes en el momento de la colisión. Debemos investigar el estado del camino. ¿Estaba seco o húmedo? ¿Daba el sol directamente sobre el rostro de uno de los conductores? Cuestiones similares a estas pueden ser también importantes para determinar las causas del choque. Para realizar un análisis completo de las causas, debemos investigar todas las condiciones importantes, tanto constantes como cambiantes. Puede resultar que muchas condiciones diferentes hayan hecho una contribución importante a la producción del resultado final.

Cuando un hombre muere, un médico debe establecer la causa de su muerte. El médico puede indicar "tuberculosis", como si sólo hubiera habido un factor que provocó la muerte. En la vida cotidiana, a menudo preguntamos por una sola causa de un suceso: *la* causa de la muerte, *la* causa de la colisión. Pero cuando examinamos la situación más cuidadosamente, vemos que es posible dar muchas respuestas, según el punto de vista desde el cual se plantee la pregunta. Un ingeniero constructor de caminos podría decir: "He dicho muchas veces, antes, que este camino es malo. Cuando está húmedo, se pone muy resbaladizo. He aquí ahora otro accidente que lo demuestra." Según este ingeniero, el accidente fue causado por el camino resbaladizo. Está interesado en el suceso desde *su* punto de vista. Señala el carácter resbaladizo del camino como *la* causa. En cierto aspecto, tiene razón. Si se hubiera seguido su consejo y se hubiera hecho el camino de otra manera, no sería tan resbaladizo. A igualdad de otros factores, el accidente quizás no se habría producido. Es difícil estar seguro de esto en un caso particular,

pero al menos es bastante probable que el ingeniero tenga razón. Cuando sostiene que "esta es la causa", quiere significar: esta es una condición importante, y de no haber estado presente, el accidente no se habría producido.

Otras personas, interrogadas acerca de la causa del accidente, podrían mencionar otras condiciones. La policía de tránsito, que estudia las causas de los accidentes de tránsito, querrá saber si alguno de los conductores violó las reglas de circulación. Su tarea es fiscalizar tales actividades, y si descubre que se han violado las reglas, atribuirá a esta violación la causa del choque. Un psicólogo que interrogue a uno de los conductores puede llegar a la conclusión de que el mismo se hallaba en un estado de ansiedad; estaba tan profundamente ensimismado en sus preocupaciones que no prestó la debida atención al acercamiento del otro automóvil en el cruce. El psicólogo dirá que el estado de ánimo perturbado del hombre fue la causa del choque. De la situación total elige el factor que más le concierne. Para él, esa es la causa interesante, decisiva. También puede tener razón, porque si el hombre en cuestión no se hubiera encontrado en un estado de ansiedad, quizás, o hasta muy probablemente, el accidente no se habría producido. Un ingeniero constructor de automóviles puede hallar otra causa, por ejemplo, un defecto en la estructura de uno de los automóviles. Un mecánico de autos puede señalar que el freno de uno de los autos estaba gastado. Contemplando el cuadro total desde su punto de vista particular, cada persona encontrará cierta condición de la que pueda decir con razón: de no haber existido esa condición el accidente no se habría producido.

Pero ninguna de esas personas ha respondido la pregunta más general: ¿Cuál fue *la* causa del accidente? Solamente dan una serie de respuestas parciales en las cuales se indican condiciones especiales que han contribuido al resultado final. No se puede señalar ninguna causa única como *la* causa. En realidad, es obvio que no hay nada semejante a

la causa. En una situación compleja, hay muchos componentes importantes, cada uno de los cuales contribuye al accidente en el sentido de que, de haber estado ausente ese componente, no se habría producido el choque. Para encontrar una relación causal entre el accidente y un suceso previo, debe considerarse a la situación anterior en su *totalidad* como dicho suceso previo. Cuando se dice que esta situación anterior "causó" el accidente, se quiere decir que, dada la situación previa, en todos sus detalles minúsculos, y dadas todas las leyes atinentes al caso, podría haberse predicho el accidente. Nadie conoce realmente ni puede conocer, por supuesto, *todos* los hechos y leyes atinentes al caso. Pero *si* alguien los hubiera conocido, podía haber predicho la colisión. Las "leyes atinentes al caso" no sólo incluyen leyes de la física y la tecnología (concernientes a la fricción en el camino, al movimiento de los autos, a la acción de los frenos, etc.), sino también leyes fisiológicas y psicológicas. Para que pueda decirse que el resultado es predecible, debe presuponerse el conocimiento de todas estas leyes y de todos los hechos particulares atinentes al caso.

Podemos resumir brevemente el resultado de este análisis: *la relación causal significa predictibilidad.* Esto no quiere decir predictibilidad real, porque nadie podría haber conocido todos los hechos y leyes atinentes al caso. Significa predictibilidad en el sentido de que, si se hubiera conocido la situación previa total, podía haberse predicho el suceso. Por esta razón, cuando uso el término "predictibilidad" lo entiendo en un sentido un poco metafórico. No implica la posibilidad de que alguien realmente prediga el suceso, sino de una predictibilidad potencial. Dados todos los hechos y las leyes de la naturaleza atinentes al caso, habría sido posible predecir el suceso antes que sucediera. Esta predicción es una consecuencia lógica de esos hechos y leyes. En otras palabras hay una relación lógica entre la descripción completa de la situación previa, las leyes atinentes al caso y la predicción del suceso.

En principio, es posible conocer los hechos particulares de la situación previa atinentes al caso. (Ignoramos aquí la dificultad práctica para obtener datos de todos los hechos, así como las limitaciones impuestas, en principio, por la teoría cuántica al conocimiento de todos los hechos en el nivel subatómico.) Con respecto al conocimiento de las leyes atinentes al caso, se plantea un problema mucho más amplio. Cuando se define una relación causal diciendo que un suceso puede ser inferido lógicamente de un conjunto de hechos y leyes, ¿qué se entiende por "leyes"? Es tentador afirmar: se alude a las leyes que pueden hallarse en los libros de texto de las diversas ciencias implicadas en la situación; más precisamente a todas las leyes atinentes al caso que se conocen en el momento del suceso. En lenguaje formal, un suceso Y en el tiempo T es causado por un suceso precedente X, si y sólo si Y es deducible de X con ayuda de las leyes L_T conocidas en el tiempo T.

Es fácil percatarse de que esta definición de relación causal no es muy útil. Consideremos el siguiente contraejemplo. Hay un informe histórico acerca de un suceso B que se produjo antiguamente después de un suceso A. La gente que vivía en el tiempo T_1 no podía explicar B. Ahora B puede ser explicado con ayuda del conocimiento de ciertas leyes, L^*, demostrando que B se desprende lógicamente de A y L^*. Pero en la época T_1 no se conocían las leyes L^*; por lo tanto, no podía explicarse el suceso B como efecto del suceso A. Supongamos que en el tiempo T_1 un científico hubiera afirmado, como hipótesis, que el suceso B fue causado por el suceso A. Considerando la cuestión retrospectivamente, se diría que su hipótesis era verdadera, aunque el científico no pudiera probarla. No podía ofrecer esta prueba porque las leyes que él conocía, L_{T_1}, no incluían las leyes L^*, que son esenciales para la prueba. Sin embargo, si se acepta la definición de relación causal sugerida en el párrafo anterior, sería necesario decir que la afirmación del científico es falsa. Es falsa, porque no pudo deducir B de A

y L_{T1}. En otras palabras, debería decirse que su afirmación es falsa aunque se sepa hoy que es verdadera.

Lo inadecuado de la definición propuesta también se hace evidente si reflexionamos en el hecho de que el conocimiento actual de las leyes de la ciencia está lejos de ser completo. Los científicos de la actualidad saben más que los científicos de cualquier período anterior, pero seguramente saben menos de lo que sabrán los científicos de dentro de cien años (suponiendo que no se destruya la civilización). En ninguna época la ciencia posee un conocimiento completo de todas las leyes de la naturaleza. Como indicamos antes, sin embargo, para obtener una adecuada definición de causalidad es necesario referirse al sistema total de leyes, y no solamente a las leyes conocidas en una época determinada.

¿Qué se quiere decir cuando se afirma que el suceso *B* es causado por el suceso *A*? Se quiere decir que hay ciertas leyes de la naturaleza a partir de las cuales puede deducirse lógicamente el suceso *B*, cuando se las combina con la descripción completa del suceso *A*. Para la cuestión no interesa que las leyes *L* puedan ser enunciadas o no. Por supuesto, interesa si se exige una prueba de que la afirmación es *verdadera*. Pero no interesa para indicar el *significado* de la afirmación. Es esta circunstancia la que hace del análisis de la causalidad una tarea tan difícil y riesgosa. Cuando se menciona una relación causal, hay siempre una referencia implícita a leyes no especificadas de la naturaleza. Sería demasiado exigente, como también sería apartarse demasiado del uso corriente, que, toda vez que alguien afirme "*A* fue la causa de *B*", esté en condiciones de enunciar todas las leyes implicadas. Por supuesto, si esa persona puede enunciar todas las leyes atinentes al caso, entonces demuestra su afirmación. Pero no se debe exigir tal prueba antes de aceptar su afirmación como significativa.

Supóngase que se hace una apuesta a que lloverá de aquí a cuatro semanas. Nadie sabe si la predicción es o no co-

rrecta. Pasarán cuatro semanas antes de que se decida la cuestión. Sin embargo, la predicción, evidentemente, tiene sentido. Los empiristas tienen razón, por supuesto, cuando dicen que un enunciado no tiene significado a menos que haya, al menos en principio, la posibilidad de encontrar elementos de juicio confirmatorios o refutatorios atinentes al enunciado. Pero esto no significa que un enunciado tenga sentido si sólo es posible determinar *hoy* su valor de verdad. La predicción relativa a la lluvia tiene sentido, aunque su verdad o falsedad no pueda ser determinada ahora. La afirmación de que *A* es la causa de *B* es también una afirmación significativa, aunque quien la formula pueda no estar en condiciones de especificar las leyes que se necesitan para demostrar la afirmación. Significa que, *si* se conocieran todos los hechos atinentes al caso vinculados con *A*, junto con todas las leyes relacionadas con la cuestión, podría predecirse *B*.

Esto plantea una cuestión difícil. ¿Implica esta definición de la relación entre causa y efecto que éste se desprende *necesariamente* de aquélla? La definición no habla de necesidad. Simplemente dice que se podría predecir el suceso *B* si se conocieran todos los hechos y leyes atinentes a él. Pero quizás esto es una petición de principios. El metafísico que desea introducir la necesidad en la definición de causalidad puede argüir: "Es verdad que no se utiliza la palabra 'necesidad'. Pero se habla de leyes, y las leyes son enunciados que expresan una necesidad. Por lo tanto, la necesidad aparece de todos modos. Es un componente indispensable de toda aserción acerca de una relación causal."

En el capítulo siguiente, consideraremos lo que puede decirse en respuesta al argumento anterior.

XX

¿LA CAUSALIDAD IMPLICA NECESIDAD?

¿Implican necesidad las leyes? Los empiristas a veces formulan su posición del siguiente modo: una ley es meramente un enunciado condicional universal. Es universal porque habla de una manera general. "En cualquier tiempo, en cualquier lugar, si hay un cuerpo o sistema físico en cierto estado, entonces, se sucederá otro estado específico." Es un enunciado *si-entonces* de forma general con respecto al tiempo y al espacio. Este enfoque es llamado a veces "condicionalismo". Una ley causal simplemente dice: siempre que se produce un suceso de la especie P (P no es un suceso particular sino una clase de sucesos), entonces se producirá un suceso de la especie Q. En forma simbólica:

$$(1) \qquad (x)\ (Px \supset Qx)$$

Este enunciado afirma que, en todo punto espaciotemporal x, si se produce P, se producirá la condición Q.

Algunos filósofos se oponen denodadamente a esta tesis. Sostienen que una ley de la naturaleza afirma mucho más que un enunciado condicional universal de la forma si-entonces. Para comprender su objeción, es necesario examinar exactamente qué se entiende por un enunciado de la forma condicional. En lugar del enunciado universal (1), consideremos un caso particular del mismo para el punto espaciotemporal a.

$$(2) \qquad Pa \supset Qa$$

El significado de este enunciado, "si P sucede en a, entonces Q sucede en a", está dado por su tabla de verdad.

Hay cuatro combinaciones posibles de valores de verdad para los dos componentes del enunciado:

1. "*Pa*" es verdadero, "*Qa*" es verdadero.
2. "*Pa*" es verdadero, "*Qa*" es falso.
3. "*Pa*" es falso, "*Qa*" es verdadero.
4. "*Pa*" es falso, "*Qa*" es falso.

El signo en forma de herradura de la implicación, "$\supset$ ", debe ser entendido de tal manera que (2) sólo afirme que no se da la segunda combinación de valores de verdad. No dice nada acerca de una conexión causal entre *Pa* y *Qa*. Si "*Pa*" es falso, el enunciado condicional es válido independientemente de que "*Qa*" sea verdadero o falso. Y si "*Qa*" es verdadero, es válido independientemente de que "*Pa*" sea verdadero o falso. Solamente es falso cuando "*Pa*" es verdadero y "*Qa*" es falso.

Obviamente, la anterior no es una interpretación fuerte de una ley. Cuando se dice, por ejemplo, que el hierro se dilata cuando se lo calienta, ¿sólo se quiere decir que un suceso sigue al otro? También podría decirse que, cuando el hierro se calienta, la Tierra rota. También este es un enunciado condicional, pero no sería llamado una ley, porque no hay ninguna razón para creer que la rotación de la Tierra tenga relación alguna con el calentamiento de un trozo de hierro. Por otra parte, cuando se enuncia una ley en forma condicional, ¿no supone esto que se afirma algún género de conexión entre los dos sucesos, una conexión que va más allá del mero hecho de que si se produce uno, también se producirá el otro?

Es cierto que, habitualmente, cuando se afirma una ley, se entiende algo más, pero es difícil determinar exactamente qué es este "algo más". Nos enfrentamos aquí con el problema de determinar exactamente cuál es el "contenido cognoscitivo" de un enunciado castellano. El contenido cognoscitivo es lo que afirma el enunciado y puede ser verdadero o falso. A menudo, es sumamente difícil determinar exactamen-

te qué es lo que pertenece al contenido cognoscitivo de un enunciado y lo que pertenece a los componentes significativos no cognoscitivos que están presentes pero son ajenos al significado cognoscitivo de dicho enunciado.

Un ejemplo de este tipo de ambigüedad es el caso de un testigo judicial que afirme: "Desgraciadamente, el camión golpeó al señor Pérez y le fracturó la cadera izquierda." Otro testigo aporta elementos de juicio que demuestran con claridad que el testigo anterior no fue sincero al decir "desgraciadamente". En realidad, se sintió satisfecho de ver lastimado al señor Pérez. ¿Mintió o no cuando usó la palabra "desgraciadamente"? Si se demuestra que el testigo no lamentó el accidente, entonces, su empleo de la palabra "desgraciadamente" era engañoso. Desde este punto de vista, podría decirse que mentía. Pero desde el punto de vista del tribunal, suponiendo que tal afirmación fue hecha bajo juramento, la cuestión del perjurio es difícil de resolver. Quizás el juez piense que el uso de la palabra "desgraciadamente" no tiene relación alguna con el contenido real del enunciado. El camión golpeó al Sr. Pérez y le fracturó la cadera. El testigo se refirió a este suceso calificándolo de desgraciado para dar la impresión de que lamentaba el accidente, aunque de hecho no lo lamentaba. Pero esto no es atinente a la afirmación fundamental de su oración.

Si el testigo hubiera dicho: "El Sr. Pérez fue golpeado por el camión y yo lamento mucho que le haya sucedido esto", su expresión de pesar habría sido más explícita y, quizás, habría más base para plantear la cuestión del perjurio. Sea como fuere, es evidente que a menudo no resulta fácil decidir qué es lo que pertenece al contenido cognoscitivo de una aserción y lo que es meramente un factor de significación no cognoscitiva. La lengua castellana tiene una gramática, pero no tiene reglas para especificar qué es lo que debe considerarse atinente al valor de verdad de una oración. Si alguien dice "desgraciadamente", cuando en realidad no siente ningún pesar, ¿es falso su enunciado?

En un diccionario o una gramática castellana no encontraremos nada que nos ayude a responder esta pregunta. Los lingüistas sólo pueden informar acerca de la manera cómo las personas de una cultura habitualmente usan ciertos enunciados, pero no pueden elaborar reglas para dirimir la cuestión en cada caso, y no es posible un análisis preciso del contenido cognoscitivo de ciertos enunciados ambiguos.

Exactamente la misma dificultad se presenta al tratar de determinar si una oración de la forma "$(x)\ (Px \supset Qx)$" es una formulación completa de una ley o si deja fuera algo esencial. Desde que los filósofos de la ciencia comenzaron a formular leyes con ayuda del símbolo "$\supset$", el conectivo de la implicación material, se han levantado voces contra esta formulación. Ciertos filósofos han sostenido que llamar a algo una "ley de la naturaleza" equivale a afirmar mucho más que el mero hecho de que un suceso siga a otro. Una ley implica que el segundo suceso *debe* seguir al otro. Hay una suerte de conexión *necesaria* entre P y Q. Antes de poder evaluar de manera cabal esta objeción, debemos determinar exactamente qué entienden estos filósofos por "necesario" y, en segundo término, si este significado pertenece o no al contenido cognoscitivo del enunciado de la ley.

Muchos filósofos han tratado de explicar qué entienden por "necesidad" cuando aplican la palabra a las leyes de la naturaleza. Un autor alemán, Bernhard Bavink, llegó a sostener (en su obra *Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften*) que la necesidad de las leyes de la naturaleza es una necesidad lógica. La mayoría de los filósofos de la ciencia niegan esto. En mi opinión, es una afirmación totalmente equivocada. "Necesidad lógica" significa "validez lógica". Un enunciado es válido lógicamente sólo si no dice nada acerca del mundo. Es verdadero simplemente en virtud de los significados de los términos que aparecen en él. Pero las leyes de la naturaleza son contingentes; esto es, dada una ley, es muy fácil describir sin contradicción una sucesión de procesos que la violen.

Consideremos la ley: "Cuando el hierro se calienta, se dilata." Otra ley dice: "Cuando el hierro se calienta, se contrae." No hay ninguna inconsistencia lógica en esta segunda ley. Desde el punto de vista de la lógica pura, no es más carente de validez que la primera ley. Se acepta la primera ley, y no la segunda, solamente porque describe una regularidad *observada en la naturaleza.* Las leyes de la lógica pueden ser descubiertas por un lógico sentado en su escritorio y que escriba signos en un papel o piense con los ojos cerrados. No hay ninguna ley de la naturaleza que pueda ser descubierta de esta manera. Las leyes de la naturaleza sólo pueden ser descubiertas observando el mundo y describiendo sus regularidades. Puesto que una ley afirma que una regularidad se cumple en todos los tiempos, debe ser una afirmación hipotética. La observación futura puede demostrar que es errónea. Las leyes de la lógica, en cambio, son válidas en todas las condiciones concebibles. Si hay alguna necesidad en las leyes de la naturaleza, ciertamente no es una necesidad lógica.

¿Qué puede querer significar, pues, un filósofo cuando alude a la necesidad de una ley natural? Quizás nuestro filósofo diga: "Quiero significar que, cuando se produce *P*, no puede ser que no le siga *Q*. *Q debe* suceder. No puede ser de otra manera." Pero expresiones como "debe suceder" y "no puede ser de otra manera" son maneras diferentes de decir "es necesario", y queda sin aclarar el significado. Sin duda, el filósofo no pretende rechazar el enunciado condicional "(x) $(Px \supset Qx)$". Está de acuerdo en que es válido, pero lo considera una formulación demasiado débil. Él quiere reforzarlo agregando algo más.

Para aclarar la cuestión, supongamos que hay dos físicos que posean el mismo conocimiento fáctico y que adopten el mismo sistema de leyes. El físico I hace una lista de estas leyes y las expresa a todas en la forma condicional universal de (x) $(Px \supset Qx)$. Está satisfecho con esta formulación y no desea agregar nada. El físico II hace la mis-

ma lista de leyes y las expresa en la misma forma condicional, pero agrega en cada caso "y esto es válido necesariamente". Las dos listas adoptarán la siguiente forma:

Físico I

Ley 1: $(x)\ (Px \supset Qx)$
Ley 2: $(x)\ (Rx \supset Sx)$
•
•
•

Físico II

Ley 1: $(x)\ (Px \supset Qx)$, y esto es válido necesariamente.
Ley 2: $(x)\ (Rx \supset Sx)$, y esto es válido necesariamente.
•
•
•

¿Hay alguna diferencia entre estos dos sistemas de leyes, en lo concerniente al significado cognoscitivo de los dos sistemas? Para responder esta pregunta, es necesario tratar de descubrir si hay alguna prueba mediante la cual se pueda establecer la superioridad de un sistema sobre el otro. Esto, a su vez, equivale a preguntarse si hay alguna diferencia en cuanto al poder de los dos sistemas para predecir sucesos observables. Supongamos que los dos físicos coinciden acerca del estado presente del tiempo. Poseen los mismos informes de las mismas estaciones meteorológicas. Sobre la base de esta información, junto con sus respectivos sistemas de leyes, predicen el estado del tiempo para mañana en Los Ángeles. Puesto que utilizan los mismos datos y las mismas leyes, sus predicciones serán, claro está, las mismas. ¿Puede el físico II hacer más o mejores predicciones que el físico I gracias a que, después de cada ley, ha agregado "y esto es válido necesariamente"? Obviamente, no. Sus adiciones no dicen nada acerca de ninguna característica observable de ningún suceso predicho.

El físico I dice: "Si P, entonces Q. Hoy se da P; por lo tanto, mañana se producirá Q." El físico II dice: "Si P, entonces Q, y esto es válido necesariamente. Hoy se da P; por lo tanto, mañana se producirá Q, por ejemplo, una tormenta. Pero, no sólo habrá una tormenta en Los Ángeles mañana, sino que *debe* haberla." Llega el día de mañana. Si hay tormenta, ambos físicos se alegrarán de su éxito. Si no la hay ambos dirán: "Tratemos de hallar la fuente de nuestro error. Quizás los informes eran incompletos o infieles. Quizás una de nuestras leyes es equivocada." ¿Pero hay alguna base sobre la cual el físico II pueda hacer una predicción que no pueda realizar el físico I? Obviamente, no. Las adiciones que el segundo físico hace a su lista de leyes carecen de toda influencia sobre la capacidad de hacer predicciones. Él cree que sus leyes son *más fuertes*, de mayor contenido, que las leyes de su rival. Pero sólo son más fuertes en su capacidad de despertar una impresión emocional de necesidad en la mente del segundo físico. No son más fuertes en su significado cognoscitivo, por cierto, puesto que el significado cognoscitivo de una ley reside en su capacidad de predicción.

No sólo es cierto que, en cualquier ensayo real, las leyes del físico II no permiten predecir más que las del físico I, sino también que no es posible *en principio* predecir más. Aun si suponemos condiciones atmosféricas hipotéticas, condiciones extrañas que nunca existieron antes en la Tierra pero que pueden ser imaginadas, los dos físicos harían predicciones idénticas sobre la base de hechos idénticos y de sus respectivas listas de leyes. Por esta razón, el empirista moderno adopta la posición de que el segundo físico no ha agregado nada significativo a sus leyes.

La anterior es, esencialmente, la posición adoptada por David Hume en el siglo XVIII. En su famosa crítica de la causalidad, Hume argüía que no hay ninguna base para suponer que haya alguna "necesidad" intrínseca en una sucesión observada de causa y efecto. Observamos el suceso

A, y luego observamos el suceso *B*. Lo que hemos observado no es más que una sucesión temporal de acontecimientos, uno después del otro. No se ha observado ninguna "necesidad". Pero si no la observamos, decía Hume, no la afirmemos. No agrega nada de valor a la descripción de nuestras observaciones. El análisis de la causalidad hecho por Hume quizás no sea totalmente claro o correcto en todos sus detalles, pero, en mi opinión, es esencialmente correcto. Además, tuvo el gran mérito de concentrar la atención de los filósofos posteriores en la manera inadecuada en la cual se había analizado anteriormente la causalidad.

Desde la época de Hume, los análisis más importantes de la causalidad –realizados por Mach, Poincaré, Russell, Schlick y otros– han dado creciente apoyo a la tesis condicionalista de Hume. Un enunciado relativo a una relación causal es un enunciado condicional. Describe una regularidad observada en la naturaleza, y nada más.

Pasemos ahora a otro aspecto de la causalidad, un aspecto importante en el cual una relación causal difiere de otras relaciones. En la mayoría de los casos, para determinar si una relación *R* rige entre un suceso u objeto *A* y un suceso u objeto *B*, simplemente estudiamos *A* y *B* cuidadosamente para ver si tienen esta relación *R*. ¿Es el edificio *A* más alto que el edificio *B*? Examinamos los dos edificios y llegamos a una conclusión. ¿Tiene el papel de empapelar *C* un matiz de azul más oscuro que el papel *D*? No es necesario examinar otras muestras de papel de empapelar para responder a esta pregunta. Estudiamos *C* y *D* a una luz normal y llegamos a una decisión sobre la base de nuestra comprensión de lo que significa un "matiz de azul más oscuro". ¿Es *E* hermano de *F*? Quizás no saben si son o no hermanos. En este caso, debemos estudiar su historia. Nos remontamos a su pasado y tratamos de determinar si tuvieron o no los mismos padres. El punto importante es que no hay necesidad de estudiar otros casos. Para establecer si existe cierta relación en un caso determinado, sólo examinamos

este caso. A veces esto es fácil de determinar, a veces es muy difícil, pero no es necesario examinar otros casos para establecer si la relación se cumple o no en el caso dado.

Con respecto a una relación causal, la situación es diferente. Para determinar si rige una cierta relación causal entre *A* y *B*, no basta definir simplemente una relación y luego estudiar el par de sucesos. Es decir, no basta teóricamente. En la práctica, no siempre es necesario examinar otros sucesos para establecer si una relación causal rige o no entre *A* y *B* porque poseemos una gran cantidad de conocimiento acerca de otros sucesos. Las leyes atinentes al caso pueden ser tan obvias y conocidas que se las supone tácitamente. Se olvida que sólo se aceptan estas leyes debido a muchas observaciones anteriores de casos en los cuales regía la relación causal.

Supongamos que veo una piedra desplazarse hacia una ventana, chocar con el vidrio y destrozarlo en mil pedazos. ¿Fue el impacto de la piedra lo que causó la destrucción del vidrio? Yo digo que sí. Usted me pregunta: ¿cómo lo sabe? Respondo: era obvio. Vi que la piedra chocó contra la ventana. ¿Qué otra cosa podía haber causado la ruptura del vidrio? Pero obsérvese que la expresión "qué otra cosa" plantea una cuestión de conocimiento concerniente a otros sucesos de la naturaleza similares al suceso en cuestión. Desde la primera infancia hemos observado cientos de casos en los cuales el vidrio se rompe por un fuerte impacto de algún tipo. Estamos tan acostumbrados a esta secuencia de sucesos que, cuando vemos que una piedra se desplaza hacia una ventana, anticipamos la ruptura del vidrio aún antes de que ocurra. La piedra choca con el vidrio. Este se rompe. Damos por supuesto que el impacto de la piedra provocó la ruptura.

Pero pensemos cuán fácil es engañarse por las apariencias. Vemos un *western* en la televisión y observamos que el villano apunta con su pistola a otro hombre y aprieta el gatillo. Se oye un balazo y el otro hombre cae muerto. ¿Por

qué cayó? Porque recibió un balazo. Pero no hubo tal balazo. Hasta el sonido del tiro puede haber sido introducido posteriormente en la banda de sonido de la película. La secuencia causal que creemos haber observado era totalmente ilusoria. No existía en absoluto.

En el caso de la piedra y de la ventana, quizás la piedra golpeó una superficie de material plástico duro e invisible situado frente a la ventana. La superficie no se rompió. Pero en el momento en que la piedra chocó contra esa superficie, alguien, dentro de la casa, rompió el vidrio por otros medios para engañarnos. Es posible, pues, equivocarse, creer que existe una relación causal donde, de hecho, no la existe. En este caso, sin embargo, tales engaños se descartan como improbables. La experiencia de sucesos similares en el pasado hace probable que se trate de otro caso de un vidrio roto por un objeto en movimiento. Si se sospecha un engaño, se hace un estudio más completo del caso.

El punto esencial, aquí, es el siguiente: ya observemos el caso superficialmente y concluyamos que la piedra, en efecto, rompió el vidrio, ya sospechemos un engaño y estudiemos el caso con mayor detalle, siempre hacemos algo más que estudiar solamente el caso en cuestión. Lo relacionamos con muchos cientos de otros casos de naturaleza similar que hemos experimentado en el pasado. Nunca es posible afirmar una relación causal solamente sobre la base de la observación de un caso. Ya de niños vemos que las cosas suceden en secuencias temporales. Gradualmente, a través de los años, nos formamos impresiones acerca de ciertas regularidades que aparecen en nuestra experiencia. Un vaso se cae y se rompe. Una pelota golpea el vidrio de un automóvil y el vidrio se rompe. Además, hay cientos de experiencias similares en las cuales un material frágil semejante al vidrio, por ejemplo, una dulcera de porcelana, se rompe después de un golpe. Sin tales experiencias, la observación de la piedra y el cristal de la ventana no sería interpretada como una relación causal.

Supongamos que en alguna época futura se elaboran cristales para ventanas que sólo pueden romperse con sonidos de frecuencias sumamente elevadas. Si este conocimiento constituyera el fondo de nuestra experiencia y si viéramos que el cristal de la ventana se rompe cuando una piedra choca con él, exclamaríamos: "¡Qué extraña coincidencia! ¡En el mismo momento en que la piedra chocó con el cristal, alguien dentro del edificio produjo un sonido de alta frecuencia que rompió el vidrio!" Es evidente, pues, que un aspecto peculiar de la relación causal, aspecto que la diferencia de otras relaciones, es que no se la puede establecer mediante la inspección de un solo caso concreto. Sólo se la puede establecer sobre la base de una ley general, la cual, a su vez, se basa en muchas observaciones de la naturaleza.

Cuando alguien afirma que *A* causó *B*, está afirmando realmente que este es un caso particular de una ley general, universal con respecto al espacio y al tiempo. Se ha observado que es válida para pares semejantes de sucesos, en otros tiempos y lugares, por lo cual se supone que es válida para todo tiempo y lugar. Se trata de una afirmación muy fuerte, de un salto audaz de una serie de casos particulares al condicional universal: para todo x, si Px, entonces Qx. Si se observa Pa, entonces, en conjunción con la ley, se deduce lógicamente Qa. Si no hubiera muchas observaciones anteriores, no podría afirmarse la ley; en esto difiere fundamentalmente la relación causal de otras relaciones. En el caso de la relación "el objeto x está dentro de la caja y", un examen de la caja particular b basta para determinar si hay adentro un objeto particular a. Pero, para determinar si la relación de causa a efecto rige en un caso particular, no es suficiente examinar este caso solamente. Primero es necesario establecer una ley, lo cual exige repetidas observaciones de casos similares.

Desde mi punto de vista, es más fructífero reemplazar todo el examen del significado de la causalidad por una

investigación de los diversos tipos de leyes que aparecen en la ciencia. Cuando se estudian estas leyes, se estudian los tipos de conexiones causales que se han observado. El problema del análisis lógico de las leyes es, por cierto, un problema más claro y más preciso que el del significado de la causalidad.

Para comprender la causalidad desde este punto de vista moderno, es instructivo considerar el origen histórico del concepto. No he realizado estudios propios en esa dirección, pero he leído con interés lo que ha escrito Hans Kelsen sobre el tema.[1] Kelsen se encuentra ahora en los Estados Unidos, pero en una época era profesor de derecho constitucional y derecho internacional en la Universidad de Viena. Cuando se produjo la revolución de 1918 y se fundó la República Austríaca, al año siguiente, fue uno de los principales autores de la nueva constitución de la República. Al analizar problemas filosóficos vinculados con el derecho, se despertó su interés, al parecer, por los orígenes históricos del concepto de causalidad.

Se dice a menudo que hay en los seres humanos una tendencia a proyectar sus propios sentimientos en la naturaleza, a suponer que los fenómenos naturales como la lluvia, el viento y el rayo están animados y actúan con propósitos similares a los de una persona. ¿Es este, quizás, el origen de la creencia de que hay "fuerzas" y "causas" en la naturaleza? Kelsen se convenció de que este análisis del origen del concepto de causalidad, por plausible que parezca, es demasiado individualista. En sus estudios sobre la primera aparición de este concepto, en la antigua Grecia, halló que el modelo fue el orden social, no el individual. Lo sugiere el hecho de que, desde un comienzo y aun hasta la actualidad, las regularidades de la naturaleza son lla-

[1] Kelsen ha expresado sus ideas en su artículo "Causality and Retribution", *Philosophy of Science*, 8 (1941), y las ha desarrollado con mayor detalle en su libro *Society and Nature* (Chicago: University of Chicago Press, 1943).

madas "leyes de la naturaleza", como si fueran similares a las leyes en el sentido político.

La explicación de Kelsen era la siguiente. Cuando los griegos iniciaron sus observaciones sistemáticas de la naturaleza y observaron diversas regularidades causales, pensaron que detrás de los fenómenos existía una cierta necesidad. La consideraron como una necesidad moral análoga a la de las relaciones entre las personas. Así como una acción mala exige castigo y una acción buena exige recompensa, así también un suceso *A* de la naturaleza exige una consecuencia *B* que restaure la armonía de las cosas, que restaure la justicia. Si en el otoño hace cada vez más frío, hasta llegar a un frío extremo en el invierno, entonces el tiempo, por así decir, se desequilibra. Para restaurar el equilibrio, la justeza de las cosas, el tiempo debe luego ser cada vez más cálido. Desgraciadamente, llega hasta el otro extremo y se hace demasiado cálido, de modo que el ciclo debe repetirse. Cuando la naturaleza se aparta demasiado de un estado de cosas equilibrado y armonioso, análogo a la sociedad armoniosa, es necesario restaurar el equilibrio mediante la tendencia opuesta. Este concepto de un orden o armonía natural reflejaba el amor de los griegos por el orden y la armonía sociales, su amor por la moderación en todas las cosas, su alejamiento de los extremos.

Consideremos el principio según el cual la causa y el efecto deben ser iguales, en cierto sentido. Este principio se encuentra en muchas leyes físicas, como la ley de Newton de que la acción va acompañada por una reacción igual. Ha sido destacada por muchos filósofos. Kelsen cree que, originalmente, era una expresión de la creencia social de que el castigo debe ser igual al delito. Cuanto más atroz es el delito, tanto más severo debe ser el castigo. Cuanto mayor es la acción buena, tanto mayor debe ser la recompensa. Se proyectó en la naturaleza tal manera de pensar, fundada en una estructura social, y se convirtió en un principio básico de la filosofía natural. "Causa aequat effec-

tum", decían los filósofos medievales. Entre los filósofos metafísicos de la actualidad, aún desempeña un papel importante.

Recuerdo una discusión que tuve una vez con una persona quien afirmaba que la teoría darwiniana de la evolución podía ser refutada completamente sobre fundamentos metafísicos. No hay manera alguna, sostenía, por la cual los organismos inferiores, con un grado de organización muy primitivo, puedan convertirse en organismos superiores, en una organización superior. Tal desarrollo violaría el principio de la igualdad de la causa y el efecto. Sólo la interferencia divina puede explicar el cambio. La creencia en el principio de la *causa aequat effectum* era tan intensa en este hombre que rechazaba una teoría científica porque suponía que violaba ese principio. No atacaba la teoría de la evolución por una estimación de los elementos de juicio atinentes a ella. Simplemente la rechazaba sobre bases metafísicas. La organización no puede provenir de la desorganización, porque la causa debe ser igual al efecto; es necesario invocar un Ser superior para explicar el desarrollo evolutivo.

Kelsen basa su punto de vista en algunas citas interesantes de filósofos griegos. Heráclito, por ejemplo, dice que el sol se mueve a través del cielo según "medidas", por las cuales el filósofo entendía los límites prescriptos de su trayectoria. "El Sol no pasará sus medidas", escribe Heráclito, "pero si lo hace, las Erinias, las doncellas de Dike, lo descubrirían". Las Erinias eran los tres demonios de la venganza, y Dike era la diosa de la justicia humana. Se explica, pues, la regularidad de la trayectoria del Sol en términos de la obediencia de éste a una ley moral decretada por los dioses. Si el Sol desobedece y se sale de su curso, la retribución lo alcanzará.

Por otra parte, hubo algunos filósofos griegos que se opusieron vigorosamente a esta concepción. Demócrito, por ejemplo, consideraba las regularidades de la naturaleza

como totalmente impersonales y no vinculadas en modo alguno con mandatos divinos. Probablemente concebía esas leyes como poseedoras de una necesidad intrínseca, metafísica; pero esta transición de la necesidad personal de los mandatos divinos a una necesidad objetiva e impersonal fue un gran paso adelante. En la actualidad, la ciencia ha eliminado el concepto de necesidad metafísica de la ley natural. Pero en la época de Demócrito, su concepción fue un importante avance con respecto a la de Heráclito.

En el libro sobre la causalidad de Philipp Frank, *Das Kausalgesetz und seine Grenzen* (publicado en Viena en 1932 y no traducido al inglés), se señala que a menudo es instructivo leer los prefacios de los textos científicos. En el resto del libro, el autor puede ser totalmente científico y precaverse de toda metafísica. Pero los prefacios son más personales. Si el autor tiene preferencia por la vieja manera metafísica de considerar las cosas, puede creer que el prefacio es el lugar adecuado para comunicar a sus lectores acerca de qué trata *realmente* la ciencia. Es aquí donde el lector puede descubrir el tipo de nociones filosóficas que el autor guardaba en el trasfondo de su mente cuando escribió su libro. Frank cita del prefacio de un texto contemporáneo de física la frase: "La naturaleza nunca viola las leyes." Parece bastante inocente, pero cuando se la analiza con cuidado, se descubre que es una observación bastante curiosa. Lo curioso no es la creencia en la causalidad, sino la manera como se la expresa. No afirma que a veces haya milagros, excepciones a la ley causal. En realidad, lo niega explícitamente. Pero lo niega diciendo que la naturaleza nunca *viola* las leyes. Sus palabras implican que la naturaleza tiene una especie de opción. Se le dan ciertas leyes a la naturaleza, y ésta podría violar alguna de ellas, de tanto en tanto; pero, como un buen ciudadano respetuoso de la ley, nunca lo hace. Si lo hiciera, presumiblemente las Erinias aparecerían en el escenario y la pondrían nuevamente en el camino correcto. Como se ve, aún subsiste

aquí la noción de las leyes como mandatos. El autor, por supuesto, se sentiría insultado si le atribuyéramos la vieja concepción metafísica de que se dan leyes a la naturaleza y ésta puede obedecerlas o no. Pero, por las palabras que elige, se presume que el viejo punto de vista persiste en su mente.

Supóngase el lector que, al visitar una ciudad por vez primera, usa un plano de la misma para orientarse. Repentinamente descubre una clara discrepancia entre el plano y las calles de la ciudad. El lector no dirá: "Las calles están desobedeciendo la ley del plano." En cambio, dirá: "El plano está equivocado." Esta es precisamente la situación del científico con respecto a las llamadas leyes de la naturaleza. Las leyes son un plano de la naturaleza trazado por los físicos. Si se descubre una discrepancia, la cuestión que se plantea no es nunca si la *naturaleza* desobedeció o no; la única cuestión es si los *físicos* cometieron o no un error.

Quizás sería menos confuso que no se usara para nada la palabra "ley" en la física. Se la continúa usando porque no hay ninguna otra palabra generalmente aceptada para indicar el tipo de enunciado universal que utiliza un científico como base para la predicción y la explicación. Sea como fuere, debe tenerse siempre en cuenta que, cuando un científico habla de una ley, simplemente alude a la descripción de una regularidad observada. La descripción puede ser exacta o defectuosa. Si no es exacta, hay que reprochárselo al científico, no a la naturaleza.

XXI

LA LÓGICA DE LAS MODALIDADES CAUSALES

Antes de penetrar más profundamente en la naturaleza de las leyes científicas quisiera aclarar algunas breves observaciones anteriores acerca de Hume. Creo que Hume tenía razón al decir que no hay ninguna necesidad intrínseca en una relación causal. Sin embargo, no niego la posibilidad de introducir un concepto de necesidad, siempre que no sea un concepto metafísico, sino un concepto perteneciente a la lógica de las modalidades. La lógica modal complementa la lógica de los valores de verdad introduciendo las categorías de necesidad, posibilidad e imposibilidad. Debe tenerse cuidado de distinguir entre las modalidades lógicas (lógicamente necesario, lógicamente posible, etc.) y otros tipos de modalidades. Sólo las modalidades lógicas han sido estudiadas intensamente. La obra más conocida de este ámbito es el sistema de implicación estricta elaborado por C. I. Lewis. Yo mismo publiqué un artículo sobre este tema. Pero con referencia a la relación causal no nos ocuparemos de la modalidad lógica, sino de la modalidad causal.

En mi opinión, es posible construir una lógica de las modalidades causales. Hasta ahora, es muy poco lo que se ha hecho en este campo. El primer intento por elaborar un sistema de este tipo parece haber sido el de Arthur W. Burks.[1] Éste propone un sistema axiomático sumamente débil. En realidad, no especifica en qué condiciones un

[1] Ver el artículo de Burks "The Logic of Causal Propositions", *Mind*, 60 (1961), 363-382.

enunciado universal sería considerado causalmente necesario. Otros han abordado el mismo problema, esencialmente, pero con una terminología diferente. Por ejemplo, Hans Reichenbach lo ha hecho en su pequeño libro *Nomological Statements and Admissible Operations.*[2] Hay muchos artículos que tratan del problema de los "condicionales contrafácticos", íntimamente vinculado con el anterior.

Un condicional contrafáctico es una aserción según la cual, si no se hubiera producido determinado suceso entonces se hubiera producido otro suceso determinado. Obviamente, no es posible trasmitir el significado de esta aserción en un lenguaje simbólico utilizando el condicional extensional (el símbolo " $\supset$ ") en el sentido en el cual se lo usa comúnmente. El intento de analizar el significado preciso de los condicionales contrafácticos plantea toda una variedad de problemas difíciles. Roderick M. Chisholm (1946) y Nelson Goodman (1947) fueron los primeros que escribieron sobre este tema.[3] Desde entonces, muchos autores han escrito otros artículos.

¿Cuál es exactamente la conexión entre el problema de los condicionales contrafácticos y el problema de formular una lógica modal que contenga el concepto de necesidad causal? La conexión reside en el hecho de que es necesario establecer una distinción entre dos tipos de enunciados universales. Por una parte, están las que pueden ser llama-

[2] Hans Reichenbach, *Nomological Statements and Admissible Operations* (Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1954); ver la crónica bibliográfica de Carl G. Hempel, *Journal of Symbolic Logic*, 20 (1956), 50-54.

[3] Sobre los condicionales contrafácticos ver el artículo de Chisholm "The Contrary-to-Fact Conditional", *Mind*, 55 (1946), 289-307, reimpreso en Herbert Feigl y Wilfrid Sellars, rec., *Readings in Philosophical Analysis* (Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1953), y Nelson Goodman, "The Problem of Counterfactual Conditionals", *Journal of Philosophy*, 44 (1947), 113-128, reimpreso en su libro *Fact, Fiction, and Forecast* (Cambridge: Harvard University Press, 1955). Ernest Nagel examina el tema en su libro *The Structure of Science* (Nueva York: Harcourt, Brace and World, 1961), pp. 68-73, y cita trabajos más recientes.

das leyes genuinas, como las leyes de la física, que describen regularidades universales en el espacio y el tiempo. Por otra parte, hay enunciados universales que no son leyes genuinas. Se han propuesto diversos términos para designarlos; a veces, se los ha llamado universales "accidentales". Un ejemplo de esos universales es: "Todas las monedas que había en mi bolsillo el 1 de enero de 1958 eran de plata." La diferencia esencial entre los dos tipos de enunciados universales puede ser mejor comprendida considerando los enunciados contrafácticos relacionados con ellos.

Consideramos primero una ley genuina, la ley de la gravitación. Ella me permite afirmar que si dejo caer una piedra, ésta caerá a tierra con determinada aceleración. Puedo expresar un enunciado similar en forma contrafáctica, diciendo: "Ayer yo tenía una piedra en la mano. Pero si no la hubiera sujetado, esto es, si hubiera aflojado mi mano, habría caído a tierra." Este enunciado no describe lo que sucedió realmente, sino lo que *habría* sucedido, si yo no hubiera sujetado la piedra. Hago esta afirmación sobre la base de la ley de la gravitación. Quizás la ley no sea invocada explícitamente, pero se la supone tácitamente. Al enunciar la ley, doy las razones para creer en el enunciado contrafáctico. Evidentemente, no creo en él porque haya visto que haya sucedido. En realidad, no sucedió. Pero es razonable afirmar el enunciado contrafáctico porque se basa en una genuina ley de la física. Se considera que la ley es una justificación suficiente del enunciado contrafáctico.

¿Puede hacerse lo mismo con el segundo tipo de enunciado universal, el universal accidental? Es evidente que ello sería absurdo. Supóngase que yo dijera: "Si este penique hubiera estado en mi bolsillo el 1 de enero de 1958, habría sido de plata." Evidentemente, la sustancia de este penique no depende de que yo lo tenga o no en mi bolsillo en ciertas fechas. El enunciado universal "todas las monedas que había en mi bolsillo el 1 de enero de 1958" no es una base adecuada para afirmar un contrafáctico.

Es evidente, pues, que algunos enunciados universales suministran una base razonable para afirmar un enunciado contrafáctico, pero otros no. Podemos estar convencidos de que un enunciado universal accidental es verdadero, pero nunca lo consideraríamos una ley. Es esencial recordar esta distinción cuando se analiza el significado de los contrafácticos. También está implicada en el problema de las modalidades no lógicas, o causales.

La idea conductora de mi enfoque del problema es la siguiente. Supongamos que alguien proponga cierto enunciado como una nueva ley de la física. No se sabe si el enunciado es verdadero o falso, porque las observaciones realizadas hasta ahora son insuficientes; pero es universal porque afirma que si se produjera determinado suceso en cualquier tiempo o lugar, se produciría también otro suceso determinado. Inspeccionando la *forma* del enunciado, puede establecerse si el enunciado sería una ley genuina *si* fuera verdadero. La cuestión de si la ley es o no verdadera no viene al caso; lo importante aquí es solamente si tiene la *forma* de una ley genuina. Por ejemplo, alguien propone una ley de la gravitación según la cual la fuerza de gravedad disminuye en forma inversamente proporcional a la tercera potencia de la distancia. Obviamente, esto es falso; es decir, en este universo, esa ley no es válida. Pero es fácil concebir un universo en el cual sea válida. Por lo tanto, en lugar de clasificar los enunciados en nomológicos o leyes genuinas (lo cual implica que son verdaderas) y no nomológicas, prefiero dividir los enunciados, independientemente de su verdad, en estas dos clases: (1) los enunciados que tienen forma de ley (llamadas a veces "forma nómica") y (2) los enunciados que no tienen esta forma. Cada una de estas clases contiene enunciados verdaderos y enunciados falsos. El enunciado "la gravedad disminuye en forma inversamente proporcional a la tercera potencia de la distancia" es del primer tipo. Tiene forma de ley, aunque no sea verdadero y, por ende, no sea una ley. El enunciado

"el 1 de enero de 1958 todos los hombres de Los Ángeles llevaban corbatas de color púrpura" es del segundo tipo. Aun cuando fuera verdadero, no expresaría una ley, sino solamente una situación accidental en un momento particular.

Tengo la convicción de que es posible definir de manera precisa la diferencia entre estos dos tipos de enunciados. Aún no se lo ha hecho, pero si se lo hiciera, tengo el presentimiento —no lo expresaré de manera más enérgica— de que sería una distinción puramente semántica. Lo que quiero decir es que, si alguien me presentara un enunciado universal y si yo tuviera suficientemente clara la diferencia entre los dos tipos, no tendría que realizar ningún experimento para establecer de qué tipo de enunciado se trata. Simplemente me preguntaría: si el mundo fuera de tal manera que *S* fuera verdadero, ¿lo consideraría como una ley? Para formular la cuestión de manera más precisa: ¿lo consideraría yo como una ley *básica*? Más adelante explicaré la razón para establecer esta distinción. Ahora sólo deseo aclarar qué entiendo por "tener la forma de una ley básica posible" o, más brevemente, "tener *forma nómica*".

La primera condición para que un enunciado tenga forma nómica fue aclarada por James Clerk Maxwell, quien, hace un siglo, elaboró la teoría electromagnética clásica. Maxwell señaló que las leyes básicas de la física no aluden a ninguna posición particular del espacio ni a ningún punto temporal particular. Son totalmente generales con respecto al espacio y al tiempo; son válidas en todas partes y en todos los tiempos. Esta sólo es una característica de las leyes *básicas*. Obviamente, hay muchas leyes técnicas y prácticas importantes que no son de este tipo. Están en una posición intermedia entre las leyes básicas y las accidentales, pues no son totalmente accidentales. Por ejemplo: "Todos los osos de la región polar septentrional son blancos." No es una ley básica, porque los hechos podrían ser de otra ma-

nera. Por otra parte, tampoco es totalmente accidental; ciertamente, no es tan accidental como el hecho de que todas las monedas de mi bolsillo sean de plata en una fecha determinada. El enunciado acerca de los osos polares depende de una serie de leyes básicas que determinan el clima del Polo Norte, la evolución de los osos y otros factores. El color de los osos no es accidental. Por otra parte, el clima puede cambiar durante el próximo millón de años. Otras especies de osos, con pieles de colores diferentes, pueden evolucionar cerca del Polo o trasladarse hasta allí. El enunciado acerca de los osos, pues, no puede ser llamado una ley básica.

A veces se considera básica una ley, pero luego resulta estar limitada a un tiempo o lugar determinado o a ciertas condiciones. Los economistas del siglo XIX hablaban de leyes de la oferta y la demanda como si fueran leyes económicas generales. Luego los marxistas sometieron a crítica esta afirmación y señalaron que tales leyes sólo eran verdaderas para un cierto tipo de economía de mercado, pero no eran en ningún sentido leyes de la naturaleza. En muchos campos —en la biología, la sociología, la antropología, la economía, etc.— hay leyes que en un principio parecen válidas en general, pero a menudo esto se debe a que el autor no miró más allá de los límites de su país, de su continente o de su período histórico. Leyes que se consideraban como expresiones de una conducta moral universal o de formas universales del culto religioso resultaron ser leyes limitadas, cuando se descubrió que otras culturas se conducían de manera diferente. Hoy se sospecha que puede haber vida en otros planetas. Si es así, muchas leyes de la biología, que son universales con respecto a los seres vivos de la Tierra, pueden no aplicarse a la vida de otras regiones de la galaxia. Evidentemente, pues, hay muchas leyes que no son accidentales, pero que son válidas sólo en ciertas regiones limitadas de espacio-tiempo, y no universalmente. Es necesario distinguir entre estas leyes y las leyes universales. Se cree

que las leyes de la física son válidas en todas partes. Cuando formuló sus ecuaciones del electromagnetismo, Maxwell estaba convencido de que no sólo eran válidas en su laboratorio, sino también en cualquier laboratorio, y no sólo en la Tierra, sino también en el espacio, en la Luna, en Marte, etc. Creía que formulaba leyes que regían en todo el universo. Aunque estas leyes han sido modificadas un poco por la mecánica cuántica, sólo han sido modificadas. En los aspectos esenciales aún se las considera universales y, siempre que un físico moderno enuncia una ley básica, la considera universal. Es necesario distinguir tales leyes básicas de las leyes restringidas espaciotemporalmente y de las leyes derivadas que sólo son válidas para ciertos tipos de sistemas físicos, para ciertas sustancias, etc.

El problema de definir con precisión qué se entiende por forma nómica, esto es, la forma de una posible ley básica, aún no ha sido resuelto. Ciertamente, la condición de Maxwell de que la ley se aplique a todos los tiempos y lugares debe formar parte de la definición. Pero debe haber otras condiciones. Se han propuesto varias, pero los filósofos de la ciencia no se han puesto de acuerdo acerca de cuáles, exactamente, deben ser estas condiciones adicionales. Dejemos de lado este problema no resuelto y supongamos que existe una definición exacta de forma nómica. Indicaré ahora de qué manera esta forma nómica, en mi opinión, puede suministrar la base para definir otros conceptos importantes.

En primer lugar, defino una *ley básica* de la naturaleza como un enunciado de forma nómica que es también verdadero. El lector quizás se sienta incómodo con esta definición. Algunos de mis amigos han sostenido que un empirista nunca debe decir de una ley que es verdadera; una ley se refiere a infinitos casos, a través del espacio y del tiempo, y ningún ser humano está en condiciones de saber con certeza si es universalmente válida o no. Estoy de acuerdo. Pero debe establecerse una clara distinción entre

certeza y verdad. Nunca hay certeza, por supuesto. En realidad, hay menos certeza con respecto a una ley básica que a un hecho singular. Estoy más seguro de que este lápiz particular ha caído de mi mano hasta el escritorio que de la universalidad de las leyes de la gravitación. Pero esto no nos impide decir significativamente de una ley que es o no verdadera. No hay ninguna razón por la cual el concepto de verdad no pueda ser utilizado para definir lo que se *entiende* por una ley básica.

Mis amigos sostenían que preferían decir, en lugar de "verdadera", "confirmada en un alto grado". Reichenbach en su libro *Nomological Statements and Admissible Operations*, ya citado, llega a la misma conclusión, aunque con una terminología diferente. Por "verdadero" entiende "bien establecido" o "altamente confirmado sobre la base de los elementos de juicio disponibles en algún tiempo pasado, presente o futuro". Pero sospecho que no es esto lo que los científicos *quieren decir* cuando hablan de una ley básica de la naturaleza. Por "ley básica" entienden algo que rige en la naturaleza independientemente de que algún ser humano tenga conciencia de ello. Estoy convencido de que esto es lo que la mayoría de los autores del pasado y los científicos actuales quieren significar cuando hablan de una ley de la naturaleza. El problema de definir "ley básica" no tiene nada que ver con el grado en el cual está confirmada una ley; tal confirmación, por supuesto, nunca puede ser suficientemente completa como para dar certeza. El problema sólo se relaciona con el significado que tiene el concepto cuando los científicos lo usan en sus exposiciones.

Muchos empiristas se sienten incómodos cuando abordan esta cuestión. Tienen la sensación de que un empirista nunca debe usar una palabra tan peligrosa como "verdadero". Otto Neurath, por ejemplo, decía que sería un pecado contra el empirismo llamar verdaderas a las leyes. Los pragmatistas norteamericanos, inclusive William James y John Dewey, sostenían puntos de vista similares. En mi opinión,

se explica este juicio por la ausencia de una distinción clara entre dos conceptos diferentes: (1) el grado en el cual se establece una ley en un momento determinado y (2) el concepto semántico de verdad de una ley. Una vez que se establece esta distinción y se comprende que es posible dar una precisa definición semántica de verdad, no hay ninguna razón para vacilar en utilizar la palabra "verdad" para definir una "ley básica de la naturaleza".

Propongo la siguiente definición: un enunciado es *causalmente verdadero*, o C-verdadero, si es una consecuencia lógica de la clase de todas las leyes básicas. Las leyes básicas se definen como enunciados que tienen forma nómica y son verdaderos. Los enunciados C-verdaderos que tienen forma universal son leyes en el sentido amplio, leyes básicas o leyes derivadas. Las leyes derivadas son las que están restringidas en el espacio y el tiempo, como las leyes meteorológicas en la Tierra.

Consideremos los dos enunciados siguientes. El primero es: "En la ciudad de Brookfield, durante marzo de 1950, todos los días en los que la temperatura estuvo por debajo del punto de congelación desde la medianoche hasta las cinco de la madrugada, a esta hora el lago de la ciudad se cubrió de hielo." Se trata de una ley derivada. Compáresela con el segundo enunciado, que es igual al primero excepto al final: "...luego, a la tarde, se jugó un partido de fútbol en el estadio." Este enunciado también es verdadero. Hubo un partido de fútbol cada sábado y la condición especificada acerca de la temperatura sólo se realizó dos veces en marzo de 1950, ambas en un sábado a la mañana. Así, el segundo enunciado, aunque es verdadero y posee la misma forma lógica que el primero, no es una ley. Sólo es un universal accidental. Este ejemplo revela que entre los enunciados *restringidos* de forma universal, aunque se los suponga verdaderos, no puede hacerse la distinción entre leyes (en este caso, derivadas) y universales accidentales exclusivamente sobre la base de un análisis semántico de

los enunciados. En mi opinión, sólo es posible hacer esta distinción indirectamente, con ayuda del concepto de ley básica. Una ley derivada es una consecuencia lógica de la clase de las leyes básicas, mientras que el enunciado accidental no lo es. Sin embargo, creo que la distinción entre las formas de las leyes básicas y los universales accidentales puede realizarse mediante un análisis puramente semántico, sin el uso de conocimientos fácticos.

En mi libro *Meaning and Necessity*[4] defiendo la tesis de que es mejor interpretar las modalidades lógicas como propiedades de proposiciones, análogamente a ciertas propiedades semánticas de los enunciados que expresan esas proposiciones. Supongamos que un enunciado E_1 de un lenguaje L expresa la proposición p_1; entonces, p_1 es una proposición lógicamente necesaria si y sólo si E_1 es L-verdadero en el lenguaje L ("L-verdadero" significa "lógicamente verdadero"). Por lo tanto, los dos enunciados siguientes son equivalentes:

(1) E_1 es L-verdadero (en L).
(2) p_1 es lógicamente necesaria.

En otras palabras, decir que una proposición es lógicamente necesaria equivale a decir que todo enunciado que exprese esta proposición es L-verdadero. Los conceptos L-semánticos (verdad-L, falsedad-L, implicación-L y equivalencia-L) pueden ser definidos para lenguajes suficientemente fuertes como para contener toda la matemática y toda la física, de modo que se ha resuelto el problema de la interpretación de necesidad *lógica*. El mejor enfoque de otras modalidades, en particular de las modalidades causales, es el análogo a éste, en mi opinión.

Como ejemplo de lo que quiero significar consideremos la diferencia entre los enunciados (1) y (2) anteriores. "E_1"

[4] Rudolf Carnap, *Meaning and Necessity: A Study in Semantics and Modal Logic* (Chicago: University of Chicago Press, 1947); ed. rev., con un nuevo prefacio, encuadernada (1956) y en rústica (1960).

es el nombre de una oración; por lo tanto, (1) es un enunciado del metalenguaje. Por otra parte, (2) es un enunciado del lenguaje-objeto, aunque no de un lenguaje-objeto extensional. Es un lenguaje-objeto cuyos conectivos no dan origen a funciones de verdad. Para dar a la oración (2) forma simbólica escribamos:

$$(3)\; N\,(p_1)$$

Esto significa "p_1 es una proposición lógicamente necesaria".

De manera análoga, yo definiría primero "forma nómica", luego "ley básica" y finalmente "C-verdadero" (causalmente verdadero). Todos éstos son conceptos semánticos. Así, si tenemos el enunciado:

(4) E_1 es C-verdadero,

yo diría que la proposición expresada por E_1 es necesaria en un sentido causal. Podemos escribir esto del siguiente modo;

(5) p_1 es causalmente necesaria.

O, en forma simbólica:

$$(6)\; N_c\,(p_1)$$

Según mi definición de los términos, la clase de las proposiciones causalmente necesarias es amplia. Contiene a las proposiciones lógicamente necesarias. Creo que esto es más conveniente que definir los mismos términos de otras maneras, pero, por supuesto, sólo se trata de una cuestión de conveniencia. El tema de las modalidades causales no ha sido muy investigado. Es un tema vasto y complejo, por lo cual no entraremos aquí en más detalles técnicos.

XXII

DETERMINISMO Y LIBRE ARBITRIO

"Causalidad" y "estructura causal del mundo" son expresiones que prefiero usar en un sentido sumamente amplio. Las leyes causales son aquellas leyes mediante las cuales es posible predecir y explicar sucesos. La totalidad de estas leyes describe la estructura causal del mundo.

Por supuesto, en el lenguaje cotidiano no se dice que *A* causa *B* a menos que *B* sea temporalmente posterior a *A* y a menos que haya una línea directa de sucesos causales que vaya de *A* a *B*. Si se ve sobre la arena la huella de un pie humano, puede inferirse que alguien caminó por la arena. No se diría que la huella *fue la causa* de que alguien caminara por la arena, aunque esta acción puede inferirse de la huella sobre la base de leyes causales. Análogamente, cuando *A* y *B* son los extremos de largas cadenas causales que se remontan a una causa común, no se dice que *A causó* *B*. Si es de día, puede predecirse la llegada de la noche porque el día y la noche tienen una causa común, pero no se dice que uno sea la causa del otro. Después de mirar un horario, puede predecirse que un tren llegará a una hora determinada; pero no se piensa que la indicación del horario causa la llegada del tren. También aquí, los dos sucesos se remontan a una causa común. Una decisión del administrador de la compañía ferroviaria dio comienzo a dos cadenas separadas de sucesos causalmente relacionados que culminaron en *A* y *B*. Cuando leemos el horario hacemos una inferencia causal que se remonta a lo largo de una cadena y luego desciende por la otra, pero se trata de un proceso tan indirecto que no decimos que *B* es causado por

A. Sin embargo, el proceso es una inferencia causal. No hay ninguna razón por la cual la expresión "ley causal" no pueda ser utilizada de una manera amplia que se aplique a todas las leyes mediante las cuales se predicen y se explican ciertos sucesos sobre la base de otros sucesos, independientemente de que las inferencias vayan hacia adelante o hacia atrás en el tiempo.

En el contexto de este punto de vista, ¿qué puede decirse acerca del significado del término "determinismo"? En mi opinión el determinismo es una tesis especial acerca de la estructura causal del mundo. Es una tesis según la cual esta estructura causal es tan fuerte que, dada una descripción completa del estado total del mundo en un instante dado, entonces, con ayuda de las leyes, puede calcularse todo suceso pasado o futuro. Este fue el punto de vista mecanicista sostenido por Newton y analizado en detalle por Laplace. Dentro de la descripción de un estado instantáneo del mundo, incluye, por supuesto, no sólo una descripción de la posición de toda partícula del mundo, sino también de su velocidad. Si la estructura causal del mundo es bastante fuerte como para permitir esta tesis —y yo he enunciado la tesis como la enunció Laplace— puede decirse que este mundo no sólo tiene una estructura causal, sino también, más específicamente, una *estructura determinista*.

En la física actual, la mecánica cuántica tiene una estructura causal que la mayoría de los físicos y de los filósofos de la ciencia describirían como no determinista. Es más débil, por decir así, que la estructura de la física clásica, porque contiene leyes básicas que son esencialmente probabilísticas; no se les puede dar una forma determinista como la siguiente: "Si ciertas magnitudes tienen ciertos valores, entonces otras magnitudes tienen otros valores exactamente especificados." Una ley estadística o probabilística dice que si ciertas magnitudes tienen ciertos valores, hay una distribución de probabilidad específica de los valores de otras magnitudes. Si algunas leyes básicas del mundo

son probabilísticas, la tesis del determinismo no es correcta. En la actualidad, la mayoría de los físicos no acepta el determinismo en el sentido estricto en el cual hemos usado aquí este término. Sólo una pequeña minoría cree que la física puede volver algún día a él. El mismo Einstein nunca abandonó esta creencia. Durante toda su vida estuvo convencido de que el actual rechazo del determinismo en la física sólo es una fase transitoria. En la actualidad, no se sabe si Einstein tenía o no razón.

El problema del determinismo, por supuesto, está vinculado estrechamente en la historia de la filosofía con el problema del libre arbitrio. ¿Puede elegir el hombre entre diversas acciones posibles o la impresión de que tiene libertad para elegir es sólo una ilusión? No haremos aquí un examen detallado de esta cuestión, porque en mi opinión no la afecta ninguno de los conceptos o teorías fundamentales de la ciencia. No comparto la opinión de Reichenbach de que, si la física hubiera conservado la posición clásica del determinismo estricto, no podríamos hablar con sentido de efectuar una elección, expresar una preferencia, tomar una decisión racional, ser responsables de nuestros actos, etc. Creo que todas esas afirmaciones tienen pleno sentido, aun en un mundo que sea determinista en el sentido fuerte.[1]

La posición que rechazo, la posición sostenida por Reichenbach y otros, puede ser resumida del siguiente modo. Si Laplace tiene razón —esto es, si todo el pasado y el futuro del mundo están determinados para todo corte trasversal temporal del mundo— entonces la palabra "elección"

[1] Se encontrará una discusión detallada de esta cuestión, desde un punto de vista con el que concuerdo, en el artículo "Freedom of the Will", que apareció en el volumen *Knowledge and Society*, editado por University of California Associates (Nueva York: Appleton Century Co., 1938). Los autores del artículo son los encargados anónimos de la edición; pero tengo entendido que el principal coautor era Paul Marhenke, ya fallecido. Dado que las tesis principales del artículo coinciden con las opiniones de Moritz Schlick, que fue profesor visitante en Berkeley antes de la publicación de este artículo, creo que el mismo muestra los efectos de su influencia.

no tiene sentido. El libre arbitrio es una ilusión. Creemos que realizamos una elección, que adoptamos una decisión; en realidad, todo suceso está predeterminado por lo que sucedió antes, inclusive antes de nacer nosotros. Para dar sentido al término "elección", pues, es necesario apelar a la indeterminación de la nueva física.

Objeto este razonamiento porque creo que contiene una confusión entre la determinación en un sentido teórico, en el cual un suceso está determinado por un suceso anterior de acuerdo con leyes (lo cual no significa más que predictibilidad sobre la base de regularidades observadas), y la compulsión. Olvidemos por un momento que, en la física actual, el determinismo, en el sentido más fuerte, no es válido. Pensemos solamente en la concepción del siglo XIX. La idea de la física aceptada más comúnmente era la enunciada por Laplace. Dado un estado instantáneo del universo, un hombre que poseyera una descripción completa de este estado, junto con todas las leyes (por supuesto, tal hombre no existe, sino que se supone su existencia), entonces podría calcular todo suceso del pasado o del futuro. Aun cuando rigiera esta versión fuerte del determinismo, no se desprende de ella que las leyes *compelan* a nadie a actuar como lo hace. Predictibilidad y compulsión son dos cosas totalmente diferentes.

Para explicar lo anterior, consideremos el caso de un prisionero encerrado en una celda. Quisiera escapar, pero está rodeado de gruesas paredes y la puerta está cerrada con cerrojo. Esta es una verdadera compulsión. Se la puede llamar una compulsión negativa, porque le impide realizar algo que quiere hacer. Existe también una compulsión positiva. Supongamos que una persona es más fuerte que otra y que ésta tiene una pistola en la mano. Quizás no quiere usarla, pero la primera toma su mano, apunta con la pistola a alguien y presiona sobre el dedo de la segunda hasta que la obliga a apretar el gatillo; la primera persona obliga a la segunda a disparar, a hacer algo que no quiere

hacer. La ley reconocerá que el responsable no es la segunda persona sino la primera. Es una compulsión positiva en un estrecho sentido físico. En un sentido más amplio, una persona puede obligar a otra con toda suerte de medios no físicos, por ejemplo, amenazándola con terribles consecuencias.

Ahora bien, comparemos la compulsión en sus diversas formas con la determinación en el sentido de la existencia de regularidades en la naturaleza. Se sabe que los seres humanos poseen ciertos rasgos de carácter que dan regularidad a su conducta. Tengo un amigo que es sumamente afecto a ciertas composiciones musicales de Bach que raramente se ejecutan. Me entero que un grupo de excelentes músicos ofrecerán una audición privada de obras de Bach en la casa de un amigo y que en el programa figuran algunas de esas composiciones. Se me invita y se me dice que puedo llevar a alguien. Llamo a mi amigo, pero ya antes de hacerlo estoy casi seguro que él querrá ir. ¿Cuál es la base sobre la que hago esta predicción? La hago, por supuesto, porque conozco su carácter y ciertas leyes de la psicología. Supongamos que él viene conmigo, como yo había esperado. ¿Se vio obligado a ir? No, fue por su propia voluntad. En realidad, nunca es más libre que cuando hace una elección de esta suerte.

Alguien le pregunta: "¿Fue usted compelido a ir a ese concierto? ¿Alguien ejerció sobre usted algún tipo de presión moral, por ejemplo, diciéndole que los músicos se ofenderían si usted no iba?"

"En modo alguno", responde. "Nadie ejerció la más mínima presión. Me gusta mucho Bach. Tenía muchas ganas de ir. Esta fue la razón por la cual fui al concierto."

La libre elección de este hombre es compatible, sin duda, con la concepción de Laplace. Aunque antes de su decisión se hubiera dispuesto de una información total acerca del universo que hiciera posible predecir su asistencia al concierto, no podría decirse que fue obligado. Solamente hay

compulsión si alguien se ve obligado por agentes exteriores a hacer algo contrario a sus deseos. Pero si la acción surgió de su propio carácter de acuerdo con las leyes de la psicología, entonces decimos que actuó libremente. Por supuesto, su carácter está moldeado por la educación, por todas las experiencias que ha tenido desde que nació, pero esto no nos impide hablar de libre elección si ésta se desprende de su carácter. Quizás esa persona a la cual le gusta tanto Bach también le gusta salir a caminar al anochecer. Ese día particular quiso oír a Bach más que salir a caminar. Actuó de acuerdo con su propio sistema de preferencias. Hizo una libre elección. Este es el aspecto negativo de la cuestión, el rechazo de la idea según la cual el determinismo clásico haría imposible hablar con sentido de la libre elección humana.

El aspecto positivo de la cuestión es igualmente importante. A menos que haya regularidad causal, que no necesita ser determinista en el sentido fuerte, sino que puede ser de un tipo más débil, a menos que haya alguna regularidad causal, pues, no es posible efectuar una libre elección. Una elección supone una preferencia deliberada por un curso de acción más que por otro. ¿Cómo sería posible una elección si no se previeran las consecuencias de cursos alternativos de acción? Hasta las opciones más simples dependen de la previsión de posibles consecuencias. Se toma un vaso de agua porque se sabe que, de acuerdo con ciertas leyes de la fisiología, calmará la sed. Por supuesto, las consecuencias sólo se conocen con variados grados de probabilidad. Esto es verdad aunque el universo sea determinista en el sentido clásico. Nunca se dispone de la información necesaria para predecir un suceso con certeza. El hombre imaginario de Laplace puede hacer predicciones perfectas, pero tal hombre no existe. La situación concreta es que el conocimiento del futuro es probabilístico, independientemente de que rija o no el determinismo en el sentido fuerte. Pero para que se pueda efectuar una libre elección, debe ser posible pesar

los resultados probables de cursos de acción alternativos; y no sería posible efectuar tal estimación si no hubiera suficiente regularidad en la estructura causal del mundo. Sin tales regularidades no habría responsabilidad moral ni responsabilidad legal. Una persona que no puede prever las consecuencias de un acto no puede ser considerada responsable de este acto, sin duda. Un padre, un maestro o un juez considera a un niño como responsable sólo en aquellas situaciones en las cuales el niño puede prever las consecuencias de sus actos. Si en el mundo no hubiera causalidad, sería inútil educar a la gente y efectuar cualquier tipo de llamado moral o político. Tales actividades sólo tienen sentido si se presupone en el mundo un cierto grado de regularidad causal.

Las ideas anteriores pueden ser resumidas de este modo. El mundo tiene una estructura causal. No se sabe si esta estructura es determinista en el sentido clásico o en una forma más débil. En ambos casos, hay un alto grado de regularidad. Esta regularidad es esencial para lo que se llama elección. Cuando una persona efectúa una elección, ésta forma parte de una de las cadenas causales del mundo. Si no hay compulsión, lo cual significa que la elección se basa en las propias preferencias derivadas del carácter de esa persona, no hay razón alguna para no considerarla una libre elección. Es cierto que fue su carácter el que la llevó a elegir como lo hizo, carácter que, a su vez, está condicionado por causas anteriores. Pero no hay razón alguna para decir que su carácter la *obligó* a elegir como lo hizo, porque la palabra "obligar" se define en términos de factores causales exteriores. Por supuesto, es posible que un psicótico se halle en un estado mental sumamente anormal, y podría decirse que cometió un crimen porque su naturaleza lo obligó a ello. Pero en este caso se usa el término "obligar" porque se piensa que su anormalidad le impidió ver claramente las consecuencias de diversos cursos de acción. Lo volvió incapaz de deliberación y decisión racionales. El problema de

saber dónde trazar la línea divisoria entre la conducta premeditada e intencional, y las acciones derivadas de estados mentales anormales es muy serio. Pero en general, la libre elección es una decisión tomada por alguien capaz de prever las consecuencias de cursos de acción alternativos y de elegir el que se prefiere. Desde mi punto de vista, no hay ninguna contradicción entre la libre elección, entendida de esta manera, y el determinismo, aun del tipo clásico fuerte.

En años recientes, varios autores han sugerido que en la adopción de decisiones pueden desempeñar un papel importante los saltos cuánticos indeterminados, a los cuales los físicos consideran debidos al azar, en un sentido básico.[2] Ahora bien, es verdad que, en ciertas condiciones, una microcausa, como un salto cuántico, puede conducir a un macroefecto observable. En una bomba atómica, por ejemplo, se produce una reacción en cadena sólo cuando se libera un número suficiente de neutrones. También es posible que en el organismo humano, más que en la mayoría de los sistemas físicos inanimados, haya ciertos puntos en los que un solo salto cuántico pueda conducir a un macroefecto observable. Pero no es probable que sean puntos en los cuales se adoptan las decisiones.

Pensemos por un momento en un ser humano en el instante de tomar una decisión. Si en este punto existe el tipo de indeterminación que manifiesta un salto cuántico, la decisión tomada en este punto sería igualmente al azar. Este carácter aleatorio no contribuye en nada a reforzar el significado de la expresión "elección libre". Una elección como ésta no sería en absoluto una elección, sino que sería un acto casual, fortuito, como si se adoptara una decisión entre dos cursos de acción posible arrojando una moneda

[2] Henry Margenau hace esta observación en su obra *Open Vistas: Philosophical Perspectives of Modern Science* (New Haven: Yale University Press, 1961). Philipp Frank, en *Philosophy of Science* (Englewood, N. J.: Prentice-Hall, 1957), Capítulo 10, Sección 4, cita muchos autores de ambos campos de la controversia.

al aire. Afortunadamente, el ámbito de indeterminación en la teoría cuántica es sumamente pequeño. Si fuera mayor, habría momentos en los cuales una mesa explotaría repentinamente o una piedra en caída libre seguiría espontáneamente una trayectoria horizontal o se remontaría en el aire. En un mundo semejante, sería posible sobrevivir, sin duda, pero no aumentaría la posibilidad de los actos de elección libre. Por el contrario, haría considerablemente más difíciles tales actos porque sería más difícil anticipar las consecuencias de las acciones. Cuando se deja caer una piedra, se espera que vaya hacia el suelo. Pero supongamos que comienza a dar vueltas en espiral y golpea a alguien en la cabeza. En tal caso, se haría responsable a la persona que la dejó caer, cuando realmente no tenía ninguna intención de golpear a nadie. Es evidente, entonces, que si las consecuencias de las acciones fueran más difíciles de prever que ahora, serían menores las probabilidades de que se realizaran los efectos deseados. Esto haría mucho más difícil la conducta moral deliberada. Lo mismo puede decirse de los procesos de azar que puedan existir dentro del organismo humano. En la medida en que influyeran sobre las elecciones, simplemente agregarían a éstas un elemento fortuito. Habría *menos* posibilidad de elección y podría esgrimirse un argumento aun más destructivo contra la posibilidad del libre arbitrio.

En mi opinión, en el aspecto práctico de la vida cotidiana, no hay ninguna diferencia entre la física clásica, con su determinismo fuerte, y la moderna física cuántica, con sus microefectos de azar. Así, la incertidumbre en la teoría cuántica es mucho menor que la incertidumbre cotidiana que deriva de las limitaciones del conocimiento. Tomemos un hombre que viva en un mundo como el descripto por la física clásica y otro que habite un mundo como el descripto por la física moderna. No hay ninguna diferencia en las dos descripciones que tenga algún efecto significativo sobre el problema de la libre elección y la conducta moral.

En ambos casos, el hombre puede predecir el resultado de sus acciones, no con certidumbre, sino solamente con cierto grado de probabilidad. La indeterminación de la mecánica cuántica no tiene efectos observables sobre la conducta de una piedra cuando la arroja un hombre, porque la piedra es un complejo enorme de miles de millones de partículas. En el macromundo de los seres humanos, la indeterminación de la mecánica cuántica no desempeña ningún papel. Por esta razón considero equivocado suponer que la indeterminación del nivel subatómico tiene relación alguna con la cuestión de la libre decisión. Pero muchos eminentes científicos y filósofos de la ciencia no piensan así, y la opinión anterior debe ser considerada como puramente personal.

Quinta Parte

LEYES TEÓRICAS Y CONCEPTOS TEÓRICOS

XXIII

TEORÍAS E INOBSERVABLES

Una de las distinciones más importantes entre dos tipos de leyes de la ciencia es la distinción entre las que podrían llamarse (no hay una terminología aceptada en general) leyes empíricas y leyes teóricas. Leyes empíricas son las que pueden ser confirmadas directamente mediante observaciones empíricas. A menudo se utiliza el término "observable" para designar un fenómeno que puede ser observado directamente; de modo que puede decirse que las leyes empíricas son leyes acerca de observables.

En este punto, debemos hacer una advertencia. Los filósofos y los científicos utilizan de manera muy diferente los términos "observable" e "inobservable". Para un filósofo, "observable" tiene un sentido más estrecho. Se aplica a propiedades como "azul", "duro", "caliente", etc. Son propiedades que se perciben directamente a través de los sentidos. Para el físico, la palabra tiene un significado mucho más amplio. Incluye a toda magnitud cuantitativa que pueda ser medida de una manera relativamente simple y directa. Un filósofo no consideraría una temperatura de 80° C, por ejemplo, o un peso de 45 kilos como un observable, porque no hay percepción sensorial directa de tales magnitudes. Para un físico, ambos son observables porque se los puede medir de una manera muy simple. El objeto que se quiere pesar es colocado en una balanza de platillos. La temperatura se mide con un termómetro. El físico no diría que la masa de una molécula, y menos aun la de un electrón, es algo observable, porque en este caso los procedimientos de medición son mucho más complicados e indirectos. Pero a las magni-

tudes que pueden ser determinadas mediante procedimientos relativamente simples —la longitud con una regla, el tiempo con un reloj o la frecuencia de ondas luminosas con un espectómetro— las llaman observables.

Un filósofo podría objetar que no se observa realmente la intensidad de una corriente eléctrica. Sólo se observa la posición de un indicador. Se introdujo un amperímetro en el circuito y se observó que la aguja señalaba la marca 5,3. Ciertamente, no se observó la intensidad de la corriente, sino que se la *infirió* a partir de lo observado.

El físico respondería que esto es verdad, pero que la inferencia no era muy complicada. El procedimiento de medición es tan simple y tan bien fundado que no puede dudarse de que el amperímetro brinda una medición exacta de la intensidad de la corriente. Por ello se la incluye entre los observables.

Aquí no se trata de quién utiliza el término "observable" de la manera correcta o adecuada. Hay un continuo que comienza con observaciones sensoriales directas y pasa a métodos de observación enormemente complejos e indirectos. Obviamente, no puede trazarse una línea divisoria tajante en este continuo; es una cuestión de grado. Un filósofo está seguro que el sonido de la voz de su mujer proveniente del otro lado de la habitación es un observable. Pero supongamos que la oye en el teléfono. ¿Es o no un observable su voz? Un físico, ciertamente, diría que cuando mira algo a través de un microscopio común está haciendo una observación directa. ¿Sucede lo mismo cuando mira a través de un microscopio electrónico? ¿Observa la trayectoria de una partícula cuando ve el rastro que deja en una cámara de burbujas? En general, el físico habla de observables en un sentido muy amplio, comparado con el estrecho sentido que da el filósofo a la palabra, pero, en ambos casos, la línea de separación entre lo observable y lo inobservable es muy arbitraria. Es conveniente recordar esto cuando se encuentran estos términos en los libros de los filósofos o los científicos. Cada autor establece el límite donde le resulta

más conveniente, según su punto de vista y no hay ninguna razón por la cual no deba gozar de este privilegio.

Las leyes empíricas, en mi terminología, son las que contienen términos directamente observables por los sentidos o medibles mediante técnicas relativamente simples. A veces, estas leyes reciben el nombre de generalizaciones empíricas, para recordar que se las obtiene mediante la generalización de los resultados de las observaciones y mediciones. No sólo incluyen leyes cualitativas simples (como "todos los cuervos son negros"), sino también leyes cuantitativas que surgen de mediciones simples. Las leyes que relacionan la presión, el volumen y la temperatura de los gases son de este tipo. La ley de Ohm, que vincula la diferencia de potencial eléctrico, la resistencia y la intensidad de la corriente, es otro ejemplo conocido. El científico realiza repetidas mediciones, halla ciertas regularidades y las expresa en una ley. Estas son las leyes empíricas. Como indicamos en capítulos anteriores, se las usa para explicar hechos observados y para predecir sucesos futuros observables.

No hay un nombre comúnmente aceptado para designar el segundo tipo de leyes, a las que yo llamo *leyes teóricas.* A veces se las llama leyes abstractas o hipotéticas. "Hipotéticas" quizás no es un nombre adecuado porque sugiere que la distinción entre los dos tipos de leyes se basa en el grado en el cual las leyes están confirmadas. Pero una ley empírica, si es una hipótesis de ensayo confirmada solamente en escasa medida, seguiría siendo una ley empírica aunque pudiera decirse que es hipotética. Una ley teórica no se distingue de una ley empírica por el hecho de que no esté bien establecida, sino por el hecho de que contiene términos de un tipo diferente. Los términos de una ley teórica no se refieren a observables aun cuando se adopte el significado amplio que da el físico a lo que puede ser observado. Son leyes acerca de entidades tales como moléculas, átomos, electrones, protones, campos electromagnéticos, etc., que no pueden ser medidas de manera simple y directa.

A un campo estático de grandes dimensiones y que no varía de un punto a otro los físicos lo llaman un campo observable porque es posible medirlo con un aparato simple. Pero si el campo varía de un punto a otro en distancias muy pequeñas, o varía muy rápidamente en el tiempo, cambiando por ejemplo miles de millones de veces por segundo, entonces no se lo puede medir directamente mediante técnicas simples. En este caso, los físicos no dirían que tal campo es un observable. A veces, los físicos distinguen de esta manera los observables de los inobservables. Si la magnitud permanece constante dentro de distancias bastante grandes o dentro de intervalos de tiempo bastante grandes, de modo que pueda aplicarse un aparato para la medición directa de dicha magnitud, al fenómeno se lo llama un *macrosuceso*. Si la magnitud cambia dentro de intervalos tan pequeños de espacio y tiempo que no puede ser medida directamente por aparatos simples, se trata de un *microsuceso*. (Los autores anteriores utilizaban los términos "microscópico" y "macroscópico", pero hoy muchos autores han abreviado estos términos reduciéndolos a "micro" y "macro".)

Un microproceso es simplemente un proceso que se desarrolla en intervalos sumamente pequeños de espacio y de tiempo. Por ejemplo, la oscilación de una onda electromagnética de luz visible es un microproceso. Su variación de intensidad no puede ser medida directamente por ningún instrumento. La distinción entre macroconceptos y microconceptos a veces es considerada paralela a la de observable y no observable. No es exactamente lo mismo, pero es bastante semejante. Las leyes teóricas se refieren a inobservables, y muy a menudo éstos son microprocesos. En este caso, las leyes son llamadas a veces microleyes. Utilizo la expresión "leyes teóricas" en un sentido más amplio que éste, de modo que incluya a todas las leyes que contienen inobservables, independientemente de que sean microconceptos o macroconceptos.

Es cierto, como dijimos antes, que no es posible definir

de manera absolutamente precisa los conceptos "observable" e "inobservable" porque forman parte de un continuo. En la práctica, sin embargo, la diferencia habitualmente es bastante grande, de modo que no es probable que surjan discrepancias. Todos los físicos estarán de acuerdo en que las leyes que relacionan la presión, el volumen y la temperatura de un gas, por ejemplo, son leyes empíricas. En este caso, la cantidad de gas es suficientemente grande como para que las magnitudes que se deben medir permanezcan constantes en un volumen de espacio y un período de tiempo bastante grandes, lo cual permite realizar mediciones directas y simples que pueden ser generalizadas en leyes. Todos los físicos estarían de acuerdo en que las leyes acerca de la conducta de moléculas aisladas son teóricas. Tales leyes se refieren a microprocesos, con respecto a los cuales las generalizaciones no pueden basarse en mediciones simples y directas.

Las leyes teóricas, por supuesto, son más generales que las leyes empíricas. Pero es importante comprender que no se puede llegar a las leyes teóricas mediante el simple expediente de tomar las leyes empíricas y luego generalizarlas un poco más. ¿Cómo llega un físico a una ley empírica? Observa ciertos sucesos de la naturaleza. Toma nota de una cierta regularidad. Describe esta regularidad haciendo una generalización inductiva. Podría suponerse que luego puede reunir un grupo de leyes empíricas, observar alguna suerte de esquema, efectuar una generalización inductiva más amplia y llegar a una ley teórica. Pero no es así.

Para aclarar lo anterior, supongamos que se ha observado que cierta barra de hierro se dilata cuando se la calienta. Después de repetir el experimento muchas veces, siempre con el mismo resultado, se generaliza dicha regularidad diciendo que la barra se dilata cuando se la calienta. Se ha anunciado una ley empírica, aunque tiene un ámbito estrecho y sólo se aplica a una barra de hierro particular. Luego se hacen nuevos ensayos con otros objetos de hierro,

con el descubrimiento subsiguiente de que, cada vez que se calienta un objeto de hierro éste se dilata. Esto permite formular una ley más general, a saber, que todos los objetos de hierro se dilatan cuando se los calienta. De manera análoga se llega a las leyes aun más generales "Todos los metales..." y "Todos los cuerpos sólidos...". Son generalizaciones simples, cada una de las cuales es un poquito más general que la anterior, pero son todas leyes empíricas. ¿Por qué? Porque en cada caso, los objetos considerados son observables (cuerpos de hierro, de cobre, de metal, sólidos); en cada caso, los aumentos de temperatura y de longitud son medibles mediante técnicas simples y directas.

En cambio, una ley teórica referente a ese proceso aludiría a la conducta de las moléculas en la barra de hierro. ¿De qué manera se vincula la conducta de las moléculas con la dilatación de la barra cuando se la calienta? Se ve inmediatamente que ahora estamos hablando de inobservables. Debemos introducir una teoría, la teoría atómica de la materia, y nos sumergimos rápidamente en leyes atómicas en las que intervienen conceptos radicalmente diferentes de los anteriores. Es verdad que estos conceptos teóricos difieren de los conceptos de longitud y temperatura sólo en el grado en el que son directa o indirectamente observables, pero la diferencia es tan grande que no hay discusión alguna acerca de la naturaleza radicalmente diferente de las leyes que es necesario formular. Las leyes teóricas se relacionan con las leyes empíricas de una manera análoga a cómo las leyes empíricas se relacionan con hechos aislados. Una ley empírica ayuda a explicar un hecho que ha sido observado y a predecir un hecho aún no observado. Análogamente, la ley teórica ayuda a explicar leyes empíricas ya formuladas y permite la derivación de nuevas leyes empíricas. Así como los hechos particulares y separados se ubican en un esquema ordenado cuando se los generaliza en una ley empírica, las leyes empíricas particulares y separadas se ajustan al esquema ordenado de una ley teórica.

Esto plantea uno de los principales problemas de la metodología de la ciencia. ¿Cómo puede obtenerse el tipo de conocimiento que permitirá justificar la afirmación de una ley teórica? Una ley empírica puede ser justificada haciendo observaciones de hechos particulares. Pero, no es posible hacer observaciones similares para justificar una ley teórica, porque las entidades mencionadas en las leyes teóricas son inobservables.

Antes de abordar este problema, debemos repetir algunas observaciones hechas ya en un capítulo anterior acerca del uso de la palabra "hecho". En el presente contexto, es importante ser extremadamente cuidadosos en el uso de esta palabra, porque algunos autores, especialmente científicos, usan "hecho" o "hecho empírico" para referirse a ciertas proposiciones que yo llamaría leyes empíricas. Por ejemplo, muchos físicos aludirán al "hecho" de que el calor específico del cobre es 0,090. Yo llamaría a este enunciado una ley, porque en su formulación completa puede verse que se trata de un enunciado condicional universal: "Para todo x y todo tiempo t, si x es un cuerpo sólido de cobre, entonces el calor específico de x en t es 0,090." Algunos físicos hasta hablarían de la ley de dilatación térmica, de la ley de Ohm y de otras leyes como de hechos. Por supuesto, luego dirán que las leyes teóricas ayudan a explicar tales hechos. Esto suena como mi afirmación de que las leyes empíricas explican hechos, pero aquí se usa la palabra "hecho" de dos maneras diferentes. Yo restrinjo la aplicación del vocablo a hechos particulares y concretos que pueden ser especificados espaciotemporalmente; por ejemplo, no a la dilatación térmica en general, sino a *la* dilatación de esta barra de hierro observada esta mañana a las diez en punto, cuando se la calentó. Es importante tener presente la manera restringida en la cual hablo de hechos. Si se utiliza de manera ambigua la palabra "hecho", se esfuma la importante diferencia entre las maneras como las leyes empíricas y las leyes teóricas sirven para la explicación.

¿Cómo pueden descubrirse leyes teóricas? No podemos decir: "Reunamos cada vez más datos, y luego generalicémoslos más allá de las leyes empíricas hasta llegar a leyes teóricas." Nunca se descubrió una ley teórica de esta manera. Observamos piedras, árboles y flores, percibimos diversas regularidades y las describimos mediante leyes empíricas. Pero por mucho o por cuidadosamente que observemos tales cosas, nunca llegamos a un punto en el cual podamos observar una molécula. El término "molécula" nunca surge como resultado de observaciones. Por esta razón, por muchas que sean las generalizaciones que efectuemos a partir de observaciones, nunca llegaremos a elaborar una teoría de los procesos moleculares. Una teoría semejante debe surgir de otra manera. No se la enuncia como una generalización de hechos sino como una hipótesis. Luego se pone a prueba la hipótesis de una manera análoga, en ciertos aspectos, al ensayo de una ley empírica. De la hipótesis se derivan ciertas leyes empíricas, las cuales, a su vez, son sometidas a prueba mediante la observación de hechos. Quizás las leyes empíricas derivadas de la teoría ya son conocidas y están bien confirmadas (estas leyes hasta pueden haber inspirado la formulación de la ley teórica). Independientemente de que las leyes empíricas derivadas sean conocidas y estén confirmadas o sean nuevas leyes confirmadas por nuevas observaciones, la confirmación de tales leyes derivadas suministra una confirmación indirecta de la ley teórica.

El punto que queremos aclarar es el siguiente. Un científico no comienza con una ley empírica, por ejemplo, la ley de Boyle sobre los gases, y luego busca una teoría acerca de las moléculas a partir de la cual poder derivar esa ley. El científico trata de formular una teoría mucho más general a partir de la cual sea posible derivar toda una variedad de leyes empíricas. Cuanto mayor es el número de estas leyes, cuanto mayor es su variedad y su falta aparente de conexión entre unas y otras, tanto más fuerte es

la teoría que las explica. Algunas de esas leyes derivadas pueden ser conocidas de antemano, pero la teoría también puede permitir la derivación de nuevas leyes empíricas que puedan ser confirmadas mediante nuevos ensayos. En tal caso, puede decirse que la teoría hizo posible predecir nuevas leyes empíricas. Se entiende esta predicción de una manera hipotética. Si la teoría es válida, también serán válidas ciertas leyes empíricas. La ley empírica predicha alude a relaciones entre observables, de modo que es posible realizar experimentos para ver si dicha ley es válida. Si se confirma la ley empírica, ello suministra una confirmación indirecta de la teoría. Toda confirmación de una ley, empírica o teórica, sólo es parcial, por supuesto, nunca completa y absoluta. Pero en el caso de las leyes empíricas es una confirmación más directa. La confirmación de una ley teórica es indirecta, porque sólo se produce a través de la confirmación de leyes empíricas derivadas de la teoría.

El valor supremo de una nueva teoría es su poder para predecir nuevas leyes empíricas. Es cierto que también es valiosa para explicar leyes empíricas conocidas, pero se trata de un valor secundario. Si un científico propone un nuevo sistema teórico a partir del cual no pueden derivarse nuevas leyes, entonces es lógicamente equivalente al conjunto de todas las leyes empíricas conocidas. La teoría puede tener cierta elegancia y puede simplificar en cierto grado el conjunto de todas las leyes conocidas, aunque es poco probable que se produzca una simplificación esencial. Por otra parte, toda nueva teoría de la física que ha significado un gran salto adelante ha sido una teoría de la cual podían derivarse nuevas leyes empíricas. Si Einstein no hubiera hecho más que proponer su teoría de la relatividad como una nueva teoría elegante que abarcara ciertas leyes conocidas y que también las simplificara en cierta medida, indudablemente su teoría no habría tenido un efecto tan revolucionario.

Por supuesto que no fue este el caso. La teoría de la

relatividad condujo a nuevas leyes empíricas que explicaron por primera vez fenómenos como el movimiento del perihelio de Mercurio y la curvatura de los rayos de luz en la vecindad del Sol. Estas predicciones demostraron que la teoría de la relatividad era algo más que una nueva manera de expresar las viejas leyes. En realidad, era una teoría de gran poder de predicción. Las consecuencias que pueden extraerse de la teoría de Einstein están lejos de haberse agotado. Son consecuencias que no hubiera sido posible deducir de teorías anteriores. Habitualmente, una teoría de semejante poder posee cierta elegancia y un efecto unificador sobre las leyes conocidas. Pero el gran valor de la teoría reside en su poder para sugerir nuevas leyes que puedan ser confirmadas por medios empíricos.

XXIV

REGLAS DE CORRESPONDENCIA

Debemos agregar una importante reserva al examen de las leyes y los términos teóricos efectuado en el capítulo anterior. La afirmación de que las leyes empíricas pueden ser deducidas de leyes teóricas es una simplificación excesiva. No es posible deducirlas directamente porque una ley teórica contiene términos teóricos, y una ley empírica sólo términos de observables. Esto impide toda deducción directa de una ley empírica a partir de una ley teórica.

Para comprender lo anterior, imaginemos que volvemos al siglo XIX y nos disponemos a enunciar por primera vez algunas leyes teóricas acerca de las moléculas de un gas. Esas leyes establecerán el número de moléculas por unidad de volumen del gas, las velocidades moleculares, etc. Para simplificar las cosas, supongamos que todas las moléculas tienen la misma velocidad. (Esta fue, en verdad, la suposición original; luego, se la abandonó en favor de cierta distribución probabilística de las velocidades.) Es necesario hacer suposiciones adicionales acerca de lo que sucede cuando las moléculas chocan. No conocemos la forma exacta de las moléculas; supongamos, pues, que son esferas diminutas. ¿Cómo chocan las esferas? Hay leyes acerca del choque de las esferas, pero se refieren a cuerpos grandes. Puesto que no podemos observar directamente las moléculas, suponemos que sus choques son análogos a los de cuerpos grandes; quizás se comportan como bolas de billar perfectas sobre una mesa sin fricción. Por supuesto, sólo se trata de suposiciones, de conjeturas sugeridas por analogías con macroleyes conocidas.

Pero ahora nos encontramos con un problema difícil. Nuestras leyes teóricas aluden exclusivamente a la conducta de moléculas, que no pueden ser vistas. ¿Cómo, pues, podemos deducir de tales leyes otra ley acerca de propiedades observables como la presión o la temperatura de un gas o propiedades de ondas sonoras que pasan a través del gas? Las leyes teóricas sólo contienen términos teóricos. Pero buscamos leyes empíricas que contengan términos observables. Obviamente, no es posible deducir tales leyes si no disponemos más que de las leyes teóricas.

Lo que nos hace falta es esto: un conjunto de reglas que vinculen los términos teóricos con los términos referentes a observables. Los científicos y los filósofos de la ciencia han reconocido hace mucho la necesidad de tal conjunto de reglas, y a menudo se ha discutido su naturaleza. Ejemplo de una regla semejante es: "Si se produce una oscilación electromagnética de una frecuencia determinada, entonces se observará un color azul-verdoso de determinado matiz." En este enunciado se vincula algo observable con un microproceso inobservable.

Otro ejemplo es: "La temperatura (medida por un termómetro, por lo cual se trata de un observable en el sentido amplio explicado antes) de un gas es proporcional a la energía cinética media de sus moléculas." Esta regla vincula un inobservable de la teoría molecular, la energía cinética de las moléculas, con un observable, la temperatura del gas. Si no existieran enunciados de este tipo, no habría manera alguna de derivar leyes empíricas acerca de observables a partir de leyes teóricas acerca de inobservables.

Diversos autores llaman a estas reglas con nombres diferentes. Yo las llamo "reglas de correspondencia". P. W. Bridgman las llama reglas operacionales. Norman R. Campbell las llama el "Diccionario".[1] Puesto que la regla vincula

[1] Ver Percy W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics* (Nueva York: Macmillan, 1927), y Norman R. Campbell, *Physics: The Ele-*

un término de una terminología con un término de otra terminología, el uso de las reglas es análogo al uso de un diccionario francés-castellano. ¿Qué significa la palabra francesa "cheval"? Miramos en el diccionario y encontramos que significa "caballo". No se trata realmente de un caso tan simple cuando se utiliza un conjunto de reglas para vincular inobservables con observables; sin embargo hay una analogía que hace de la palabra "Diccionario" utilizada por Campbell un nombre sugerente para designar ese conjunto de reglas.

Puede caerse en la tentación de pensar que el conjunto de reglas suministra un medio para definir términos teóricos; en realidad, sucede justamente lo contrario. Un término teórico nunca puede ser definido explícitamente sobre la base de términos que designan observables, aunque a veces un observable puede ser definido en términos teóricos. Por ejemplo, "hierro" puede ser definido como una sustancia consistente en pequeñas partes en forma de cristales, cada una de las cuales presenta un cierto ordenamiento de átomos y cada átomo es una configuración de partículas de determinado tipo. Es posible, pues, expresar en términos teóricos qué se entiende por el término, referente a un observable, "hierro", pero lo inverso no es cierto.

No hay respuesta alguna al interrogante: "¿Qué es exactamente un electrón?" Más adelante volveremos a esta cuestión, porque es el tipo de pregunta que los filósofos siempre plantean a los científicos. Ellos quieren que el físico les diga exactamente qué entiende por "electricidad", "magnetismo", "gravedad", "una molécula", etc. Si el físico explica estos vocablos en términos teóricos, el filósofo puede sentirse defraudado. "No es ese el sentido de mi pregunta", dirá. "Quiero que usted me diga, en el lenguaje corriente, qué

ments (Cambridge: Cambridge University Press, 1920). Ernest Nagel, en *The Structure of Science* (Nueva York: Harcourt, Brace & World, 1961), pp. 97-105, examina el problema de las reglas de correspondencia.

significan esos términos." A veces, el filósofo escribe un libro en el que habla de los grandes misterios de la naturaleza. "Hasta ahora —escribe— nadie ha podido darnos, y quizás nadie podrá nunca darnos, una respuesta directa al interrogante: '¿Qué es la electricidad?' Así, la electricidad será siempre uno de los grandes e insondables misterios del universo."

Pero no hay ningún misterio especial aquí. Sólo hay una pregunta mal formulada. No debe pedirse definiciones que, por la naturaleza del caso es imposible dar. Si un niño no sabe qué es un elefante, podemos decirle que es un animal enorme con grandes orejas y una larga trompa. Podemos mostrarle una fotografía de un elefante. Se presta muy bien para definir un elefante en términos de observables que un niño pueda comprender. Por analogía, existe la tentación de creer que, cuando un científico introduce términos teóricos, también debe ser capaz de definirlos en términos familiares. Pero esto no es posible. No hay manera de que el físico pueda mostrarnos una fotografía de la electricidad del mismo modo que puede mostrar a un niño una fotografía de un elefante. Hasta a las células de un organismo, si bien no se las puede ver a simple vista, se las puede representar mediante un cuadro porque se las puede ver a través de un microscopio. Pero no poseemos un cuadro del electrón. No podemos decir qué aspecto tiene o cómo es al tacto, porque no lo podemos ver ni tocar. Lo más que podemos hacer es decir que se trata de un cuerpo sumamente pequeño que se comporta de determinada manera. Esto puede parecer análogo a nuestra descripción de un elefante. Podemos describir un elefante como un animal grande que se comporta de determinada manera. ¿Por qué no hacer lo mismo con un electrón?

La respuesta es que el físico sólo puede describir la conducta de un electrón enunciando leyes teóricas, y estas leyes sólo contienen términos teóricos. Describen el campo creado por un electrón, la reacción de un electrón en un

campo, etc. Si un electrón está en un campo electrostático, su velocidad se acelerará de cierta manera. Desgraciadamente, la aceleración del electrón es un inobservable. No es como la aceleración de una bola de billar, que puede ser estudiada por observación directa. No hay ninguna manera de definir un concepto teórico en términos de observables. Por lo tanto, debemos resignarnos a que las definiciones del tipo que es posible dar para términos referentes a observables no puedan ser formuladas para términos teóricos.

Es cierto que algunos autores, inclusive Bridgman, han considerado esas reglas como "definiciones operacionales". Bridgman tenía cierta justificación para hacerlo, porque utilizaba sus reglas de una manera un poco diferente que la mayoría de los físicos, creo yo. Él era un gran físico y era consciente, por cierto, de que se apartaba del uso común de las reglas, pero también aceptaba ciertas formas de lenguaje que no son habituales, lo cual explica la diferencia. En un capítulo anterior, señalamos que Bridgman prefería afirmar que no hay un solo concepto de intensidad de corriente eléctrica, sino una docena de conceptos. Cada uno de los procedimientos por los cuales puede medirse una magnitud brinda una definición operacional de esta magnitud. Puesto que hay diferentes procedimientos para medir corrientes, hay también diferentes conceptos. Por conveniencia, el físico habla de un solo concepto de corriente. Pero hablando estrictamente, sostenía Bridgman, deben reconocerse muchos conceptos diferentes, cada uno de los cuales está definido por un procedimiento operacional de medición diferente.

Nos enfrentamos aquí con una elección entre dos lenguaje físicos diferentes. Si se sigue el procedimiento habitual entre los físicos, los diversos conceptos de corriente serán reemplazados por uno solo. Esto significa que se coloca el concepto en las leyes teóricas, porque las reglas operacionales son reglas de correspondencia, como yo las llamo, que vinculan los términos teóricos con los empíricos.

Debe abandonarse toda aspiración a obtener una definición —esto es, una definición operacional— del concepto teórico. Bridgman podía decir que tenía definiciones operacionales de sus términos teóricos porque no se refería a un concepto general. Él aludía a conceptos parciales, cada uno de los cuales estaba definido por un procedimiento empírico diferente.

Aun en la terminología de Bridgman, la cuestión de si es posible definir adecuadamente sus conceptos parciales mediante reglas operacionales es problemática. Reichenbach a menudo habla de lo que él llama "definiciones correlativas" (en sus publicaciones en alemán, las llama *Zuordnungsdefinitionen*, de *zuordnen*, que significa correlacional). Quizás "correlación" es un término más apropiado que "definición" para designar las funciones que realmente cumplen las reglas de Bridgman. En la geometría, por ejemplo, Reichenbach señala que el sistema axiomático elaborado por David Hilbert, pongamos por caso, es un sistema axiomático no interpretado. Los conceptos básicos de punto, línea y plano también podrían ser llamados "clase alfa", "clase beta" y "clase gamma". No debemos dejarnos seducir por el sonido de palabras familiares, como "punto" y "línea", y pensar que se las debe tomar en su significado ordinario. En el sistema axiomático son términos no interpretados. Pero cuando se aplica la geometría a la física, es menester vincular esos términos con sucesos del mundo físico. Podemos decir, por ejemplo, que las líneas rectas de la geometría son ejemplificadas por los rayos de luz en el vacío o por cuerdas tensas. Para vincular los términos no interpretados con fenómenos físicos observables, debemos disponer de reglas para establecer la conexión.

El nombre que apliquemos a estas reglas sólo es, por supuesto, una cuestión terminológica; pero debemos tener cuidado de no considerarlas como definiciones. No son definiciones en ningún sentido estricto de la palabra. No podemos dar una definición realmente adecuada del concepto

geométrico de "línea recta" con referencia a algo que exista en la naturaleza. Los rayos de luz, las cuerdas tensas, etc., sólo son rectas aproximadamente; además, no son líneas, sino solamente segmentos de líneas. En geometría, una línea recta es de longitud infinita y absolutamente recta. Ningún fenómeno de la naturaleza manifiesta alguna de esas propiedades. Por esta razón, no es posible dar definiciones operacionales, en el sentido estricto de la expresión, de los conceptos de la geometría teórica. Lo mismo puede decirse de todos los otros conceptos teóricos de la física. Hablando estrictamente, no hay "definiciones" de tales conceptos. Prefiero no hablar de "definiciones operacionales", ni siquiera usar la expresión de Reichenbach "definiciones correlativas". En mis publicaciones (sólo en años recientes he escrito acerca de esta cuestión), las he llamado "reglas de correspondencia".

Campbell y otros autores hablan a menudo de las entidades de la física teórica como de entidades matemáticas. Quieren decir con esto que las entidades están relacionadas entre sí de maneras que es posible expresar mediante funciones matemáticas. Pero no son entidades matemáticas como las que se definen en matemática pura. En ésta es posible definir diversos tipos de números, la función logarítmica, la función exponencial, etc. Pero no es posible definir términos como "electrón" y "temperatura" mediante la matemática pura. Los términos físicos sólo pueden ser introducidos con ayuda de constantes no lógicas, basadas en observaciones del mundo real. Esta es una diferencia esencial entre un sistema axiomático de la matemática y un sistema axiomático de la física.

Si queremos dar una interpretación a un término de un sistema de axiomas matemático, podemos hacerlo dando una definición tomada de la lógica. Consideremos, por ejemplo, el término "número" tal como se lo usa en el sistema axiomático de Peano. Podemos definirlo en términos lógicos, por ejemplo, según el método de Frege-Russell.

De esta manera, se llega a una definición completa y explícita del concepto de "número" sobre la base de la lógica pura. No hay ninguna necesidad de establecer una conexión entre el número 5 y observables tales como "azul" y "caliente". Los términos sólo tienen una interpretación lógica; no se necesita ninguna conexión con el mundo real. A veces, a un sistema axiomático de la matemática se lo llama una teoría. Los matemáticos hablan de la teoría de conjuntos, de la teoría de grupos, de la teoría de matrices, de la teoría de la probabilidad, etc. En estos casos, se usa la palabra "teoría" de manera puramente analítica. Designa un sistema deductivo que no contiene referencia alguna al mundo real. Debemos tener siempre presente que este uso de la palabra "teoría" es totalmente diferente de su uso con referencia a teorías empíricas como la teoría de la relatividad, la teoría cuántica, la teoría psicoanalítica y la teoría económica keynesiana.

Un sistema de postulados de la física no puede estar, como lo están las teorías matemáticas, en un espléndido aislamiento del mundo. Sus términos axiomáticos —"electrón", "campo", etc.— deben ser interpretados mediante reglas de correspondencia que los vinculen con fenómenos observables. Esta interpretación es necesariamente incompleta. Y como siempre es incompleta, el sistema queda abierto para permitir la incorporación de nuevas reglas de correspondencia. En verdad, esto es lo que sucede constantemente en la historia de la física. No aludo a una revolución en la física por la cual se elabore una teoría totalmente nueva, sino de cambios menos radicales que modifiquen las teorías existentes. La física del siglo XIX suministra un buen ejemplo de esto, porque la mecánica clásica y el electromagnetismo se hallaban bien establecidos y, durante muchas décadas, hubo relativamente pocos cambios en las leyes fundamentales. Las teorías básicas de la física permanecían inmutables. Sin embargo, hubo una constante adición de nuevas reglas de correspondencia, porque se

desarrollaron constantemente nuevos procedimientos para medir tal o cual magnitud.

Por supuesto, los físicos siempre corren el riesgo de elaborar reglas de correspondencia que *sean incompatibles* entre sí o entre ellas y las leyes teóricas. Pero en la medida en que no surge tal incompatibilidad tienen libertad para agregar nuevas reglas de correspondencia. El procedimiento nunca tiene fin. Existe siempre la posibilidad de agregar nuevas reglas, incrementando de este modo la interpretación específica de los términos teóricos; pero por mucho que se la incremente, la interpretación nunca es definitiva. Con un sistema matemático, la situación es diferente. Aquí la interpretación lógica de un término axiomático *es* completa. En este hecho hallamos otra razón para resistirnos a considerar a los términos teóricos como "definidos" por las reglas de correspondencia. Si no adoptamos esta actitud, se esfumaría la importante distinción entre la naturaleza de un sistema axiomático de la matemática pura y la de un sistema axiomático de la física teórica.

¿No se puede interpretar un término teórico mediante reglas de correspondencia de manera tan completa que no sea posible ninguna ulterior interpretación? Quizás el mundo real sea limitado en su estructura y en sus leyes. Eventualmente, puede llegarse a un punto más allá del cual no sea posible reforzar la interpretación de un término mediante nuevas reglas de correspondencia. En tal caso, ¿no suministrarían las reglas una definición final y explícita del término? Sí, pero entonces ya no sería un término teórico. Pasaría a formar parte del lenguaje observacional. La historia de la física todavía no sugiere que ésta se halle en vías de completarse; sólo ha habido una constante adición de nuevas reglas de correspondencia y una modificación continua de las interpretaciones de términos teóricos. No hay ninguna manera de saber si este es un proceso infinito o si eventualmente tendrá fin.

También se puede considerar esto del siguiente modo. En

la física no hay prohibición alguna que impida dar a las reglas de correspondencia para un término tanta fuerza que éste llegue a estar definido explícitamente y, por ende, a cesar de ser teórico. Tampoco hay base alguna para suponer que siempre será posible agregar nuevas reglas de correspondencia. Debido a que la historia de la física muestra una modificación tan firme e incesante de los conceptos teóricos, la mayoría de los físicos se pronunciarían en contra de la adopción de reglas de correspondencia tan fuertes que conviertan a un término teórico en otro definido explícitamente. Además es un procedimiento totalmente innecesario. Nada se gana con él. Hasta puede tener el efecto adverso de obstaculizar el progreso.

También en este caso, por supuesto, debemos reconocer que la distinción entre observables e inobservables es una cuestión de grado. Podríamos dar una definición explícita, mediante procedimientos empíricos, de un concepto como el de longitud, porque su medición es muy fácil y directa, y es improbable que las nuevas observaciones obliguen a modificarlo. Pero sería imprudente buscar para el término "electrón" reglas de correspondencia tan fuertes que quede definido explícitamente. Está tan lejos de las observaciones simples y directas que es mejor conservarlo como término teórico, sujeto a modificaciones basadas en nuevas observaciones.

XXV

CÓMO SE DEDUCEN DE LAS LEYES TEÓRICAS NUEVAS LEYES EMPÍRICAS

En el Capítulo XXIV, examinamos las maneras de utilizar las reglas de correspondencia para vincular los términos referentes a inobservables de una teoría con los términos referentes a observables de las leyes empíricas. Podemos aclarar mejor dicho examen mediante algunos ejemplos de la manera como se derivan realmente leyes empíricas de las leyes de una teoría.

El primer ejemplo está tomado de la teoría cinética de los gases. El modelo o cuadro esquemático es un conjunto de pequeñas partículas llamadas moléculas, todas las cuales se hallan en agitación constante. En su forma original, la teoría concebía estas partículas como diminutas bolillas, todas de la misma masa y —cuando la temperatura del gas es constante— de la misma velocidad constante. Luego se descubrió que el gas no se hallaría en un estado estable si todas las partículas tuvieran la misma velocidad; fue necesario encontrar una cierta distribución probabilística de las velocidades que fuera estable. Se la llamó la distribución de Boltzmann-Maxwell. Según esta distribución, hay una cierta probabilidad de que cada molécula esté dentro de un cierto intervalo de la escala de velocidades.

Cuando se creó la teoría cinética, no se conocían muchas de las magnitudes que aparecen en las leyes de la teoría. No se conocía la masa de una molécula ni se sabía cuántas moléculas contiene un centímetro cúbico de gas a una temperatura y una presión determinadas. Se expresaban estas magnitudes mediante ciertos parámetros introducidos

en las leyes. Después de que se formularon las ecuaciones, se preparó un diccionario de reglas de correspondencia. Estas reglas de correspondencia vinculaban los términos teóricos con fenómenos observables de una manera que permitía determinar indirectamente los valores de los parámetros que figuraban en las ecuaciones. Esto, a su vez, permitió deducir leyes empíricas. Una regla de correspondencia declara que la temperatura del gas corresponde a la energía cinética media de las moléculas. Otra regla de correspondencia vincula la presión del gas con el choque de las moléculas con las paredes del recipiente. Aunque este es un proceso discontinuo en el que intervienen moléculas discretas, el efecto total puede ser considerado como una fuerza constante que presiona sobre la pared. Así, por medio de reglas de correspondencia, la presión que se mide macroscópicamente mediante un manómetro puede ser expresada en términos de la mecánica estadística de las moléculas.

¿Cuál es la densidad del gas? La densidad es igual a la masa por la unidad de volumen, pero, ¿cómo medimos la masa de una molécula? Nuevamente, nuestro diccionario —un diccionario muy simple— nos suministra la regla de correspondencia. La masa total M del gas es la suma de las masas m de las moléculas. M es observable (simplemente pesamos el gas), pero m es teórica. El diccionario de reglas de correspondencia da la conexión entre los dos conceptos. Con ayuda de este diccionario es posible realizar ensayos empíricos de diversas leyes deducidas de nuestra teoría. Sobre la base de la teoría, es posible prever lo que sucederá con la presión del gas cuando el volumen permanece constante y la temperatura aumenta. Podemos prever lo que sucederá con una onda sonora producida golpeando un lado del recipiente y lo que sucederá si sólo se calienta parte del gas. Estas leyes teóricas están formuladas en términos de varios parámetros que aparecen en las ecuaciones de la teoría. El diccionario de reglas de correspondencia nos permite expresar estas ecuaciones como

leyes empíricas, cuyos conceptos son medibles, de modo que sea posible asignar valores a los parámetros mediante procedimientos empíricos. Si es posible confirmar las leyes empíricas, esa confirmación es también una confirmación indirecta de la teoría. Antes de la creación de la teoría cinética se conocían muchas leyes empíricas de los gases, por supuesto. La teoría brindó una explicación de estas leyes. Además, condujo a leyes empíricas anteriormente desconocidas.

La teoría del electromagnetismo, elaborada alrededor de 1860 por dos grandes físicos ingleses, Michael Faraday y James Clerk Maxwell (Faraday realizó la mayor parte de la labor experimental y Maxwell la mayor parte de la labor matemática), ejemplifica de manera sorprendente el poder de una teoría para predecir nuevas leyes empíricas. La teoría se refiere a cargas eléctricas y a su comportamiento en campos eléctricos y magnéticos. El concepto de electrón —una partícula diminuta con una carga eléctrica elemental— sólo fue enunciado a fines de ese siglo. El famoso conjunto de ecuaciones diferenciales de Maxwell destinadas a describir campos electromagnéticos sólo presuponía pequeños cuerpos discretos de naturaleza desconocida, capaces de llevar una carga eléctrica a un polo magnético. ¿Qué sucede cuando pasa una corriente por un alambre de cobre? El diccionario de la teoría hizo corresponder este fenómeno observable con el movimiento a lo largo del alambre de pequeños cuerpos cargados. A partir del modelo teórico de Maxwell, fue posible (con ayuda de reglas de correspondencia, por supuesto) deducir muchas de las leyes conocidas de la electricidad y el magnetismo.

El modelo posibilitó muchas cosas más. En las ecuaciones de Maxwell había un cierto parámetro *c*. Según el modelo, una perturbación de un campo electromagnético se propagaría mediante ondas cuya velocidad sería *c*. Los experimentos eléctricos demostraron que el valor de *c* es aproximadamente de 3×10^{10} centímetros por segundo. Este valor

era el de la velocidad de la luz, y parecía improbable que se tratara de un accidente. ¿Es posible, se preguntaban los físicos, que la luz sea simplemente un caso especial de propagación de una oscilación electromagnética? No pasó mucho tiempo antes de que las ecuaciones de Maxwell suministraran explicaciones de todo tipo de leyes ópticas, inclusive la refracción, la velocidad de la luz en medios diferentes, etcétera.

Los físicos se hubieran sentido muy complacidos con descubrir solamente que el modelo de Maxwell explicaba las leyes eléctricas y magnéticas conocidas; pero recibieron una doble dádiva. ¡La teoría también explicaba las leyes ópticas! Finalmente, el gran valor del nuevo modelo quedó de manifiesto también en su poder para predecir y formular leyes empíricas desconocidas hasta entonces.

El primer ejemplo lo suministró Heinrich Hertz, el físico alemán. Alrededor de 1890, comenzó sus famosos experimentos para determinar si era posible producir y detectar en el laboratorio ondas electromagnéticas de baja frecuencia. La luz es una oscilación y propagación electromagnética de ondas de frecuencias muy elevadas. Pero las leyes de Maxwell admitían que tales ondas tuvieran *cualquier* frecuencia. Los experimentos de Hertz dieron como resultado el descubrimiento de las que en un principio fueron llamadas ondas hertzianas. Actualmente se las llama ondas de radio. Al principio, Hertz logró trasmitir estas ondas de un oscilador a otro situado a una distancia pequeña, primero a algunos centímetros y luego a un metro o más. En la actualidad, una radioemisora envía sus ondas a muchos miles de kilómetros.

El descubrimiento de las ondas de radio fue sólo el comienzo de la derivación de nuevas leyes a partir del modelo teórico de Maxwell. Se descubrieron los rayos X y se pensó en un principio que eran partículas de enorme velocidad y poder de penetración. Luego se les ocurrió a los físicos que, al igual que la luz y las ondas de radio, podían ser

ondas electromagnéticas de frecuencias sumamente elevadas, mucho más altas que la frecuencia de la luz visible. Más tarde se confirmó también esto, y las leyes referentes a los rayos X fueron derivadas de las ecuaciones fundamentales de Maxwell. Los rayos X resultaron ser ondas de un cierto intervalo de frecuencias dentro del intervalo de frecuencias mucho más amplio de los rayos gamma. Los rayos X utilizados actualmente en la medicina son simplemente rayos gamma de cierta frecuencia. Todo esto era en gran medida previsible sobre la base del modelo de Maxwell. Sus leyes teóricas, junto con las reglas de correspondencia, condujeron a una enorme variedad de nuevas leyes empíricas.

La gran variedad de campos en los cuales se halló confirmación experimental contribuyó especialmente a la fuerte confirmación total de la teoría de Maxwell. Las diversas ramas de la física habían sido desarrolladas originalmente por razones prácticas; en la mayoría de los casos, las divisiones se basaban en nuestros diversos órganos de los sentidos. Como los ojos perciben la luz y el color, llamamos ópticos a estos fenómenos; como nuestros oídos oyen sonidos, llamamos acústica a la correspondiente rama de la física; y como nuestros cuerpos experimentan el calor, tenemos una teoría del calor. Nos es útil construir máquinas simples basadas en los movimientos de los cuerpos, y a su teoría la llamamos mecánica. Otros fenómenos, como los de la electricidad y el magnetismo, no pueden ser percibidos directamente, pero podemos observar sus consecuencias.

En la historia de la física, siempre constituye un gran paso adelante cuando una rama de la física puede ser explicada por otra. La acústica, por ejemplo, llegó a ser considerada una parte de la mecánica, porque las ondas sonoras son simplemente ondas elásticas en sólidos, líquidos y gases. Ya hemos indicado cómo se llegó a explicar las leyes de los gases por la mecánica de las moléculas en movimiento. La teoría de Maxwell fue otro gran paso hacia la unificación de la física. Se descubrió que la óptica es una parte de la

teoría electromagnética. Lentamente tomó cuerpo la idea de que, algún día, sería posible unificar toda la física en una gran teoría. En la actualidad hay un enorme abismo entre el electromagnetismo, por una parte, y la gravitación, por la otra. Einstein hizo varios intentos por elaborar una teoría del campo unificado que permitiera salvar este abismo; más recientemente, Heisenberg y otros hicieron intentos similares. Pero hasta ahora no se ha elaborado ninguna teoría que sea enteramente satisfactoria o que brinde nuevas leyes empíricas capaces de ser confirmadas.

La física comenzó originalmente como una macrofísica descriptiva, con un número enorme de leyes empíricas sin conexiones aparentes. En los comienzos de una ciencia, los científicos pueden estar muy orgullosos de haber descubierto cientos de leyes. Pero, a medida que las leyes se reproducen, comienzan a sentirse incómodos en esta situación; comienzan a buscar principios unificadores subyacentes. En el siglo XIX hubo mucha controversia acerca de la cuestión de los principios subyacentes. Algunos pensaban que la ciencia debe hallar tales principios, porque de lo contrario no sería más que una descripción de la naturaleza, no una verdadera explicación. Otros pensaban que este es un enfoque equivocado, que los principios subyacentes pertenecen sólo a la metafísica. Consideraban que la tarea del científico es meramente describir, descubrir *cómo* suceden los fenómenos naturales, no *por qué.*

En la actualidad, sonreímos un poco ante la gran controversia sobre descripción *versus* explicación. Comprendemos que ambas partes podían esgrimir algunos buenos argumentos, pero que su manera de discutir la cuestión era fútil. No hay ninguna verdadera oposición entre la explicación y la descripción. Por supuesto, si se toma la descripción en el sentido más estrecho, es decir, como una mera descripción de lo que un científico hace un día determinado con determinados materiales, entonces los adversarios de la mera descripción tenían razón al exigir algo más, una ver-

dadera explicación. Pero en la actualidad comprendemos que la descripción en el sentido amplio, el de colocar los fenómenos en el contexto de leyes más generales, suministra el único tipo de explicación que puede darse de ellos. Análogamente, si los defensores de la explicación aluden a una explicación metafísica, no fundada en procedimientos empíricos, entonces sus adversarios tenían razón al insistir que la ciencia sólo debe ocuparse de la descripción. Ambas partes tenían un argumento válido. Tanto la descripción como la explicación, correctamente entendidas, son aspectos esenciales de la ciencia.

Los primeros intentos de explicación, los de los filósofos jónicos, de la naturaleza eran metafísicos en parte, ciertamente; el mundo es todo fuego, o todo agua o todo cambio. Esos primeros esfuerzos de explicación científica pueden ser considerados de dos maneras diferentes. Podemos decir: "Esto no es ciencia, sino metafísica pura. No hay ninguna posibilidad de confirmación ni reglas de correspondencia que vinculen la teoría con fenómenos observables." Por otra parte, podemos decir: "Estas teorías jónicas no son científicas, ciertamente, pero al menos son visiones gráficas de teorías. Son los comienzos primitivos de la ciencia."

No debe olvidarse que, tanto en la historia de la ciencia como en la historia psicológica de un científico creador, a menudo una teoría surge como una especie de visualización, como una visión que le llega a un científico en la forma de una inspiración, mucho antes de que descubra reglas de correspondencia mediante las cuales pueda confirmar su teoría. Cuando Demócrito afirmaba que todo está formado por átomos, no tenía, por cierto, la menor confirmación de su teoría. Sin embargo, fue un chispazo de genio, una visión profunda, porque dos mil años después su visión fue confirmada. Por lo tanto, no debemos rechazar demasiado rápidamente una visión anticipatoria de una teoría, siempre que se la pueda someter a prueba en algún momento futuro. Pero pisamos terreno sólido si planteamos

la condición de que ninguna hipótesis puede pretender que se la considere científica a menos que ofrezca la *posibilidad* de ser sometida a prueba. No tiene que estar confirmada para ser una hipótesis, pero debe haber reglas de correspondencia que permitan, en principio, confirmar o refutar la teoría. Puede ser enormemente difícil concebir experimentos que permitan someterla a prueba; tal es el caso, actualmente, con diversas teorías del campo unificado que se han propuesto. Pero si tales ensayos son posibles en principio, la teoría puede ser considerada científica. Cuando se propone por primera vez una teoría, no debemos pedir más que esto.

El desarrollo de la ciencia a partir de la filosofía primitiva fue un proceso gradual. Las teorías de los filósofos jónicos fueron las más primitivas. En contraste con ellas, el pensamiento de Aristóteles fue mucho más claro y se asentó en un fundamento científico más sólido. Realizó experimentos y comprendió la importancia de los experimentos, aunque en otros aspectos fue un apriorista. Este fue el comienzo de la ciencia. Pero sólo en la época de Galileo Galilei, alrededor del 1600, se dio verdadera importancia al método experimental con preferencia al razonamiento apriorístico sobre la naturaleza. Aunque muchos de los conceptos de Galileo habían sido enunciados antes de él como conceptos teóricos, él fue el primero en colocar la física teórica sobre un sólido cimiento empírico. La física de Newton (alrededor de 1670) fue la primera teoría amplia y sistemática que contenía inobservables como conceptos teóricos: la fuerza universal de la gravitación, un concepto general de masa, las propiedades teóricas de los rayos de luz, etc. Su teoría de la gravitación tenía gran generalidad. Entre dos partículas cualesquiera, grandes o pequeñas, hay una fuerza proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Antes de que Newton elaborara esta teoría, la ciencia no disponía de ninguna explicación que se aplicara tanto a la caída de una piedra como a los movimientos de los planetas alrededor del Sol.

En la actualidad, puede resultarnos extraño que nunca se le ocurriera a nadie, antes de Newton, que la misma fuerza hace que la manzana caiga y la Luna gire alrededor de la Tierra. En realidad, no era probable que tal pensamiento se le ocurriera a nadie. No porque la *respuesta* fuera muy difícil de dar, sino porque nadie había planteado la *pregunta*. Este es un punto fundamental. Nadie se había preguntado: "¿Cuál es la relación entre las fuerzas que los cuerpos celestes ejercen unos sobre otros y las fuerzas terrestres que hacen que los objetos caigan al suelo?" Aun hablar en términos tales como "terrestre" y "celeste" es establecer una división, distinguir en la naturaleza dos regiones fundamentalmente diferentes. La gran visión de Newton consistió en superar esta división, en afirmar que no existe ningún abismo fundamental. Existe una naturaleza, un mundo. La ley universal de la gravitación era la ley teórica que explicaba por primera vez tanto la caída de una manzana como las leyes de Kepler acerca de los movimientos de los planetas. En la época de Newton, pensar en tales términos generales era una aventura psicológicamente difícil y sumamente osada.

Posteriormente, por supuesto, los científicos descubrieron la manera de determinar las masas de los cuerpos astronómicos por medio de reglas de correspondencia. La teoría de Newton también sostenía que dos manzanas colocadas una frente a la otra sobre una mesa se atraen mutuamente. No se desplazan la una hacia la otra porque la fuerza de atracción es sumamente pequeña y la fricción, sobre la mesa, muy grande. Luego, los físicos lograron medir realmente las fuerzas gravitacionales entre dos cuerpos en el laboratorio. Utilizaron una balanza de torsión, consistente en una barra con una bola de metal en cada extremo y suspendida por el centro de un largo cable unido a un cielorraso elevado (cuanto más largo y más delgado sea el cable, tanto más fácilmente girará la barra). En realidad, la barra nunca está en reposo absoluto, sino que siempre oscila levemente. Pero puede establecerse el punto medio

de la oscilación de la barra. Después de determinar la posición exacta del punto medio, construyeron una gran pila de ladrillos de plomo cerca de la barra. (Se usó el plomo a causa de su elevada gravedad específica. El oro tiene una gravedad específica aun mayor, pero los ladrillos de oro son muy caros.) Se observó que el punto medio de la barra oscilante se había desplazado en una minúscula proporción de modo que una de las bolas del extremo de la barra quedó más cerca de la pila de plomo. El desplazamiento sólo era de una fracción de milímetro, pero bastó para suministrar la primera observación en un laboratorio de un efecto gravitacional entre dos cuerpos, efecto que había sido predicho por la teoría de la gravitación de Newton.

Antes de Newton se sabía que las manzanas caen al suelo y que la Luna se mueve alrededor de la Tierra. Pero antes de Newton nadie podía haber predicho el resultado del experimento con la balanza de torsión. Es un ejemplo clásico del poder de una teoría para predecir un nuevo fenómeno no observado anteriormente.

XXVI

LA ORACIÓN DE RAMSEY

La teoría científica, en el sentido en el cual estamos usando la expresión —postulados teóricos combinados con reglas de correspondencia que vinculan términos teóricos y términos observacionales— ha sido intensamente analizada y discutida en años recientes por los filósofos de la ciencia. Buena parte de esta discusión es tan nueva que aún no se la ha publicado. En este capítulo introduciremos un importante enfoque nuevo del tema que se remonta a un artículo poco conocido del lógico y economista de Cambridge: Frank Plumpton Ramsey.

Ramsey murió en 1930 a la edad de 26 años. No vivió lo suficiente como para completar su libro, pero después de su muerte Richard Bevan Braithwaite editó en 1931 una colección de sus artículos bajo el título de *The Foundations of Mathematics*.[1] En este libro figura un artículo breve titulado "Theories". En mi opinión, este artículo merece mucha más atención que la que ha recibido. Quizás el título del libro atrajo solamente a lectores interesados en la fundamentación lógica de la matemática, y pasó por alto otros importantes artículos del libro, como el artículo sobre las teorías.

Ramsey estaba desconcertado por el hecho de que los términos teóricos —los términos para los objetos, propiedades, fuerzas y sucesos descriptos en una teoría— no son significativos de la misma manera que los términos obser-

[1] Ramsey, *The Foundations of Mathematics* (Londres: Routledge and Kegan Paul, 1931), reimpreso en rústica por Littlefield, Adams (1960).

vacionales como "barra de hierro", "caliente", "rojo", etc. ¿Cómo adquiere significado, pues, un término teórico? Todo el mundo está de acuerdo en que deriva su significado del contexto de la teoría. "Gene" deriva su significado de la teoría genética. Los postulados de la física de partículas dan una interpretación de "electrón". Pero nos enfrentamos con muchas cuestiones confusas y desconcertantes. ¿Cómo es posible determinar el significado *empírico* de un término teórico? ¿Qué nos dice una teoría determinada acerca del mundo real? ¿Describe la estructura del mundo real o es solamente un recurso abstracto y artificial para poner orden en la gran masa de experiencias, en forma algo similar a un sistema de contabilidad que permite mantener registros ordenados de las operaciones financieras de una empresa? ¿Puede decirse que un electrón "existe" en el mismo sentido en el que existe una barra de hierro?

Hay procedimientos para medir las propiedades de una barra de manera simple y directa. Es posible determinar su peso y su volumen con gran exactitud. Podemos medir las longitudes de onda de la luz emitida por la superficie de una barra de hierro caliente y definir con precisión qué queremos decir cuando afirmamos que la barra de hierro está "roja". Pero cuando tratamos con las propiedades de entidades teóricas, como el "spin" de una partícula elemental, sólo hay procedimientos complicados e indirectos para dar al término un significado empírico. Primero, debemos introducir la palabra "spin" en el contexto de una elaborada teoría de la mecánica cuántica; luego, la teoría debe ser vinculada con observables de laboratorio mediante otro complejo conjunto de postulados: las reglas de correspondencia. Evidentemente, el spin no tiene un fundamento empírico simple y directo como el color rojo de una barra de hierro calentada. ¿Cuál *es*, exactamente, su *status* cognoscitivo? ¿Cómo es posible distinguir los términos teóricos, que deben estar vinculados de alguna manera con el mundo real y sujeto a ensayos empíricos, de los términos metafí-

sicos que se encuentran tan a menudo en la filosofía tradicional, términos que no tienen ningún significado empírico? ¿Cómo puede justificarse el derecho de un científico a hablar de conceptos teóricos, sin justificar al mismo tiempo el derecho de un filósofo a usar términos metafísicos?

Al buscar respuestas a estas desconcertantes cuestiones Ramsey hizo una sugerencia novedosa y sorprendente. Propuso reemplazar el sistema formado por los postulados teóricos y de correspondencia de una teoría por lo que hoy se llama la "oración de Ramsey de la teoría". En ésta, que es equivalente a los postulados de la teoría, no figuran para nada términos teóricos. En otras palabras, se soslayan las cuestiones desconcertantes mediante la eliminación de los términos que provocan el planteo de las mismas.

Supongamos que estamos considerando una teoría con n términos teóricos: "T_1", "T_2", "T_3"..., "T_n". Estos términos son introducidos por los postulados de la teoría. Están vinculados con términos referentes a observables mediante las reglas de correspondencia de la teoría. En estas reglas de correspondencia aparecen m términos observacionales: "O_1", "O_2", "O_3"... "O_m". La teoría misma es una conjunción de todos los postulados teóricos y todos los postulados de correspondencia. Una formulación completa de la teoría, pues, contendrá los conjuntos combinados de términos T y O: "T_1", "T_2",..., "T_n"; "O_1", "O_2",..., "O_m". Ramsey propuso que, en esta oración que es la enunciación completa de la teoría, todos los términos teóricos sean reemplazados por variables correspondientes: "U_1", "U_2", ..., "U_n", y que se agreguen a esta fórmula lo que los lógicos llaman "cuantificadores existenciales": '$(\exists U_1)$, '$(\exists U_2)$', ..., '$(\exists U_n)$. Esta nueva oración, con sus variables U y sus cuantificadores existenciales, es llamada la "oración de Ramsey".

Para comprender exactamente este desarrollo, consideremos el siguiente ejemplo. Tomemos el símbolo "Mol" para designar la clase de las moléculas. En lugar de referirnos a

"una molécula", la llamamos "un elemento de Mol". Análogamente, "Himol" representa a "la clase de las moléculas de hidrógeno"; "una molécula de hidrógeno" es "un elemento de Himol". Se supone establecido un sistema de coordenadas espaciotemporales, de modo que podemos representar un punto espaciotemporal por sus cuatro coordenadas: x, y, z, t. Adoptamos el símbolo "Temp" para el concepto de temperatura. Luego, "la temperatura (absoluta) del cuerpo b en el tiempo t es 500" puede ser expresado así: "Temp $(b, t) = 500$". De este modo, se expresa la temperatura como una relación en la que intervienen un cuerpo, un punto temporal y un número. Podemos indicar "la presión de un cuerpo b en el tiempo t" por "Pres(b, t)". Representamos el concepto de masa por el símbolo "Masa". En lugar de "la masa de un cuerpo b (en gramos) es 150", escribimos: "Masa$(b) = 150$". La masa es una relación entre un cuerpo y un número. Sea "Vel" la velocidad de un cuerpo (puede ser un macrocuerpo o un microcuerpo); por ejemplo, "Vel$(b, t) = (r_1, r_2, r_3)$", donde el miembro derecho de la ecuación se refiere a una terna de números reales, o sea, los componentes de la velocidad de las direcciones x, y, z. Vel es, pues, una relación concerniente a un cuerpo, una coordenada de tiempo y una terna de números reales.

Hablando en general, el lenguaje teórico contiene "términos de clases" (como los términos que designan macrocuerpos, microcuerpos y sucesos) y "términos de relaciones" (como los términos para diversas magnitudes físicas).

Consideremos la teoría TC ("T" representa a los postulados teóricos y "C" a los postulados que estipulan las reglas de correspondencia). Los postulados de esta teoría incluyen algunas leyes de la teoría cinética de los gases, leyes concernientes a los movimientos de las moléculas, a sus velocidades, choques, etc. Hay leyes generales acerca de cualquier gas, pero también hay leyes especiales acerca del hidrógeno. Además, hay macroleyes de teoría de los gases acerca de la temperatura, la presión y la masa total de un (marco)

cuerpo gaseoso. Supongamos que los postulados teóricos de la teoría *TC* contienen todos los términos mencionados antes. Para mayor brevedad, en lugar de indicar inextenso todos los postulados *T*, indicamos solamente los términos teóricos y ponemos puntos en reemplazo del simbolismo relacionante: (*T*) . . . Mol . . . Himol . . . Temp . . . Pres . . . Masa . . . Vel . . .

Para completar la simbolización de la teoría *TC*, debemos considerar los postulados de correspondencia para algunos —no necesariamente todos— de los términos teóricos. Estos postulados *C* pueden ser reglas operacionales para la medición de la temperatura y la presión (es decir, una descripción de la construcción de un termómetro y un manómetro, así como reglas para determinar los valores de la temperatura y la presión a partir de los números leídos en las escalas de los instrumentos). Los postulados C contendrán los términos teóricos "Temp" y "Pres", y una serie de términos observacionales: "O_1", "O_2", . . ., "O_m". Así los postulados C pueden ser expresados de una manera breve y resumida, escribiendo:

(*C*) . . . Temp . . . O_1 . . . O_2 . . . O_3 . . .
Pres . . . O_4 . . . O_m . . .

Ahora podemos representar toda la teoría del siguiente modo:

(*TC*) . . . Mol . . . Himol . . . Temp . . . Pres . . .
Masa . . . Vel . . .; Temp . . . O_1 . . . O_2 . . .
O_3 . . . Pres . . . O_4 . . . O_m . . .

Para transformar esta teoría *TC* en la oración de Ramsey correspondiente, se requieren dos pasos. Primero, reemplazamos todos los términos teóricos (los términos de clases y los términos de relaciones) por variables de clases y de relaciones arbitrariamente elegidas. Por ejemplo, donde aparece "Mol" en la teoría, lo sustituimos por la variable "C_1". Donde aparece "Himol", reemplazamos esta expresión por otra variable de clase, como "C_2". El término relacional "Temp" es reemplazado en todas partes (tanto en la parte

T como en la parte *C* de la teoría) por una variable relacional como "R_1". Del mismo modo, reemplazamos "Pres", "Masa" y "Vel" por otras tres variables relacionales, "R_2", "R_3" y "R_4", respectivamente. Podemos indicar de esta manera el resultado final:

$$\ldots C_1 \ldots C_2 \ldots R_1 \ldots R_2 \ldots R_3 \ldots R_4 \ldots; \\ \ldots R_1 \ldots O_1 \ldots O_2 \ldots O_3 \ldots R_2 \ldots \\ O_4 \ldots O_m \ldots$$

Este resultado (que debe suponerse escrito detalladamente, y no abreviado mediante puntos, como hemos hecho aquí) ya no es una oración (como son *T*, *C* y *TC*). Es una fórmula oracional abierta o, como se la llama a veces, una forma oracional o una función oracional (sentence function).

El segundo paso, que transforma la fórmula oracional abierta en la oración de Ramsey, ^{R}TC, consiste en escribir frente a la fórmula oracional seis cuantificadores existenciales, uno para cada una de las seis variables:

$$(^{R}TC)\ (\exists C_1)\ (\exists C_2)\ (\exists R_1)\ (\exists R_2)(\exists R_3)\ (\exists R_4)\ [\ldots C_1 \\ \ldots C_2 \ldots R_1 \ldots R_2 \ldots R_3 \ldots R_4 \ldots; \\ \ldots R_1 \ldots O_1 \ldots O_2 \ldots O_3 \ldots R_2 \ldots \\ O_4 \ldots O_m \ldots]$$

Una fórmula precedida por un cuantificador existencial afirma que hay, al menos, una entidad (del tipo al cual se refiere) que satisface la condición expresada por la fórmula. Así, la oración de Ramsey indicada antes dice (aproximadamente) que hay (al menos) una clase C_1, una Clase C_2, una relación R_1, otra R_2, otra R_3 y otra R_4 tales que:

(1) Las seis clases y relaciones están vinculadas entre sí de una manera especificada (a saber, especificada en la parte primera, o *T*, de la fórmula).

(2) Las dos relaciones R_1 y R_2 están vinculadas con las *m* entidades observacionales $O_1, \ldots, O_m$ de cierta manera (o sea, de la manera especificada por la parte segunda, o *C*, de la fórmula).

Lo que es importante observar es que en la oración de Ramsey los términos teóricos han desaparecido. En su lugar hay variables. La variable "C_1" no se refiere a ninguna clase particular. Sólo se afirma que hay al menos una clase que satisface ciertas condiciones. El significado de la oración de Ramsey no varía si se cambian arbitrariamente las variables. Por ejemplo, los símbolos "C_1" y "C_2" pueden ser intercambiados o reemplazados por otras variables arbitrarias, como "X_1" y "X_2". El significado de la oración sigue siendo el mismo.

Puede parecer que la oración de Ramsey no es más que otra manera indirecta de expresar la teoría original. En cierto sentido, esto es verdad. Es fácil demostrar que todo enunciado acerca del mundo real que no contenga términos teóricos —esto es, todo enunciado que puede recibir confirmación empírica— y que se deduzca de la teoría también se deduce de la oración de Ramsey. En otras palabras, la oración de Ramsey tiene exactamente el mismo *poder explicativo y predictivo* que el sistema original de postulados. Ramsey fue el primero en comprenderlo. Fue una visión importante, aunque pocos de sus colegas le prestaron mucha atención. Una de las excepciones fue Braithwaite, que fue amigo de Ramsey y que editó sus artículos. En su libro *Scientific Explanations* (1953), Braithwaite examina la idea de Ramsey y destaca su importancia.

El hecho importante es que ahora podemos evitar las inquietantes cuestiones metafísicas que infestan la formulación original de las teorías y podemos introducir una simplificación en esta formulación. Antes, teníamos términos teóricos, tales como "electrón", de dudosa "realidad" porque estaban muy lejos del mundo observable. Cualquier significado empírico parcial que se le diera a estos términos sólo se les podía dar por el procedimiento indirecto de enunciar un sistema de postulados teóricos y conectar estos postulados con observaciones empíricas por medio de reglas de correspondencia. En la manera de hablar de Ramsey acerca del

mundo externo, un término como "electrón" desaparece. Esto no implica en modo alguno que desaparezcan los electrones, o, más precisamente, que lo que existe en el mundo externo y está simbolizado por la palabra "electrón" desaparezca. La oración de Ramsey continúa afirmando, a través de sus cuantificadores existenciales, que hay algo en el mundo externo que tiene todas esas propiedades que los físicos asignan al electrón. No pone en duda la existencia, la "realidad", de esta entidad. Simplemente propone una manera diferente de hablar acerca de ella. La cuestión inquietante que elude no es "¿existen los electrones?", sino "¿cuál es el *significado* exacto del término 'electrón'?" En la manera de Ramsey de hablar acerca del mundo, esta cuestión no se plantea. Ya no es necesario indagar el significado de "electrón", porque el término mismo no aparece en el lenguaje de Ramsey.

Es importante comprender, y este punto no fue suficientemente subrayado por Ramsey, que el enfoque de éste no puede decirse que lleva las teorías al lenguaje observacional, si por esto se entiende (como sucede a menudo) un lenguaje que sólo contiene términos observacionales y los términos de la lógica y la matemática elementales. La física moderna exige una matemática sumamente complicada y de alto nivel. La relatividad, por ejemplo, exige una geometría no-euclidiana y el cálculo de tensores, y la mecánica cuántica también requiere conceptos matemáticos igualmente elaborados. No puede decirse, pues, que una teoría física, expresada en la forma de una oración de Ramsey, sea una oración de un lenguaje observacional *simple*. Exige un lenguaje observacional ampliado, que es observacional porque no contiene términos teóricos, pero ha sido extendido de manera que incluya una lógica avanzada y compleja que comprenda virtualmente a la totalidad de la matemática.

Supongamos que en la parte lógica de este lenguaje observacional ampliado introducimos una serie de dominios de entidades matemáticas, D_0, D_1, D_2,..., tales que:

(1) El dominio D_0 contiene los números naturales (0, 1, 2, . . .).

(2) Para todo dominio D_n, el dominio D_{n+1} contiene todas las clases de elementos de D_n.

El lenguaje ampliado contiene variables para todos estos tipos de entidades, junto con adecuadas reglas lógicas para usarlos. Creo que este lenguaje es suficiente, no sólo para formular todas las teorías actuales de la física, sino también todas las teorías futuras, al menos por un tiempo futuro prolongado. Por supuesto, no es posible prever los tipos de partículas, campos, interacciones u otros conceptos que los físicos puedan introducir en los siglos futuros. Pero creo que estos conceptos teóricos, por extraños y complejos que sean, pueden ser formulados —mediante el recurso de Ramsey— en el mismo lenguaje observacional ampliado del que se dispone ahora, que contiene los términos observacionales combinados con la lógica y la matemática avanzadas.[2]

Por otra parte, Ramsey no pretendía, ciertamente, que los físicos abandonaran los términos teóricos en sus discursos y escritos, ni nadie ha sugerido nada semejante. Hacerlo exigiría introducir enunciados de enorme complicación. Por ejemplo, es fácil decir en el lenguaje corriente que un cierto objeto tiene una masa de 5 gramos. En la notación simbólica de una teoría, antes de transformarla en una oración de Ramsey, se puede decir que el objeto número 17 tiene una masa de 5 gramos escribiendo: "Masa (17) = 5". Pero en el lenguaje de Ramsey, el término "Masa" no aparece. Sólo figura la variable "R_3" (como en el ejemplo anterior). ¿Cómo puede traducirse al lenguaje de Ramsey la oración "Masa (17) = 5"? Obviamente, "R_3 (17) = 5" no es la

[2] He defendido esta tesis con mayor extensión y mayores detalles técnicos en mi artículo "Beobachtungssprache und theoretische Sprache", *Dialectica*, 12 (1958), 236-248; reimpreso en W. Ackermann y otros, ed. *Logica: Studia Paul Bernays dedicata* (Neuchâtel, Suiza: Éditions du Griffon, 1959), pp. 32-44.

traducción buscada; ni siquiera es una oración. La fórmula debe ser completada con las suposiciones concernientes a la relación R_3 que se especifican en la oración de Ramsey. Además, no bastaría escoger solamente las fórmulas de los postulados en las que figura "R_3". Se necesitan *todos* los postulados. Por lo tanto, la traducción de esta breve oración al lenguaje de Ramsey exige una oración inmensamente larga que contenga las fórmulas correspondientes a todos los postulados teóricos, todos los postulados de correspondencia y sus cuantificadores existenciales. Aunque se adopte la forma abreviada utilizada antes, la traducción es bastante larga:

$$(\exists C_1)\ (\exists C_2) \ldots (\exists R_3)\ (\exists R_4)\ [\ldots C_1 \ldots$$
$$C_2 \ldots R_1 \ldots R_2 \ldots R_3 \ldots R_4 \ldots; \ldots R_1 \ldots$$
$$O_1 \ldots O_2 \ldots O_3 \ldots R_2 \ldots O_4 \ldots O_m \ldots$$
$$\text{y } R_3\,(17) = 5].$$

Es evidente que no sería conveniente usar la manera de hablar de Ramsey en lugar de la forma de expresión corriente de la física, forma en la cual se usan términos teóricos. Ramsey solamente quería poner en claro que es *posible* formular cualquier teoría en un lenguaje sin términos teóricos, pero que diga lo mismo que el lenguaje convencional.

Cuando afirmamos que "dice lo mismo", sólo queremos significar que dice lo mismo en lo que concierne a todas las consecuencias observables. Por supuesto, no dice *exactamente* lo mismo. El primer lenguaje presupone que los términos teóricos como "electrón" y "masa" aluden a una entidad que es algo *más* que lo determinado por el contexto de la teoría misma. Algunos autores llaman a esto el "significado excedente" de un término. Cuando se toma en cuenta este significado excedente, los dos lenguajes no son equivalentes, por cierto. La oración de Ramsey representa el contenido observacional total de una teoría. La gran visión de Ramsey consistió en comprender que este contenido observacional es todo lo que se necesita para que la teoría funcione como

tal, esto es, para explicar hechos conocidos y predecir nuevos hechos.

Es cierto que para los físicos es mucho más conveniente hablar en el lenguaje abreviado que incluye términos teóricos como "protón", "electrón", y "neutrón". Pero si se les pregunta si los electrones "realmente" existen, pueden responder de diferentes maneras. Algunos físicos se contentan con interpretar los términos como "electrón" a la manera de Ramsey. Eluden la cuestión acerca de su existencia diciendo que hay ciertos sucesos observables, en las cámaras de burbujas, etc., que es posible describir mediante ciertas funciones matemáticas dentro del armazón de determinado sistema teórico. Más allá de esto, no afirman nada. Preguntar si realmente *hay* electrones es lo mismo, desde el punto de vista de Ramsey, que preguntar si la física cuántica es verdadera. La respuesta es que, en la medida en que la física cuántica esté confirmada por los ensayos, es justificable afirmar que hay ciertos tipos de sucesos a los cuales, en el lenguaje de la teoría, se los llama "electrones".

Este punto de vista recibe a veces el nombre de concepción "instrumentalista" de las teorías. Es cercano a la posición defendida por Charles Peirce, John Dewey y otros pragmatistas, así como por muchos otros filósofos de la ciencia. Desde este punto de vista, las teorías no tratan de la "realidad". Son simplemente herramientas lingüísticas para organizar los fenómenos observacionales de la experiencia en algún tipo de esquema que funcione con eficiencia en la predicción de nuevos observables. Los términos teóricos son símbolos convenientes. Se adoptan los postulados que los contienen porque son útiles, no porque sean "verdaderos". No tienen ningún significado excedente más allá de la manera como funcionan dentro del sistema. No tiene sentido hablar del electrón "real" o del campo electromagnético "real".

Se opone a esta tesis la concepción "descripcionista" o "realista" de las teorías (a veces se distingue la concepción

descripcionista de la realista, pero no es necesario entrar aquí en estas diferencias sutiles). Los defensores de este enfoque consideran conveniente y psicológicamente reconfortante concebir los electrones, los campos magnéticos y las ondas gravitacionales como entidades reales acerca de las cuales la ciencia sabe cada vez más. Señalan que no hay ninguna línea divisoria neta entre un observable como una manzana y un inobservable como un neutrón. Una ameba no es observable a simple vista, pero es observable a través de un microscopio común. Un virus ni siquiera es observable a través de un microscopio común, pero puede verse claramente su estructura a través de un microscopio electrónico. No es posible observar un protón de esta manera directa, pero puede observarse su rastro a través de una cámara de burbujas. Si es permisible afirmar que la ameba es "real", no hay razón alguna por la cual no deba ser permisible decir que el protón es igualmente real. Las concepciones cambiantes acerca de la estructura de los electrones, los genes, etc. no significan que no haya nada "allí", detrás de cada fenómeno observable; simplemente indican que se aprende cada vez algo más acerca de la estructura de esas entidades.

Los defensores de la concepción descripcionista nos recuerdan que las entidades inobservables frecuentemente pasan al ámbito de lo observable a medida que se construyen instrumentos de observación más poderosos. En una época, "virus" era un término teórico. Lo mismo es cierto de "molécula". Ernst Mach se oponía tan enérgicamente a concebir una molécula como una "cosa" existente que en cierta oportunidad la llamó una "imagen sin valor". En la actualidad, hasta los átomos de una red cristalina pueden ser fotografiados bombardeándolos con partículas elementales; en cierto sentido, hasta el átomo mismo se ha convertido en un observable. Los defensores de esta tesis arguyen que es tan razonable decir que un átomo "existe" como decir que existe una estrella lejana, observable solamente como una tenue

mancha luminosa en una placa fotográfica expuesta durante largo tiempo. Por supuesto, no hay ninguna manera similar de observar un electrón. Pero esto no es una razón para negarse a decir que existe. Hoy se sabe poco de su estructura; mañana puede saberse mucho más. Es tan correcto considerar que un electrón es una cosa existente como lo es considerar que las manzanas, las mesas y las galaxias son cosas existentes, sostienen los defensores del enfoque descripcionista.

Es obvio que existe una diferencia entre los significados de los instrumentalistas y la manera realista de hablar. Mi propia opinión, que no detallaré aquí, es que el conflicto entre los dos enfoques es esencialmente lingüístico. Es una cuestión que depende de la manera de hablar que se prefiera en un conjunto determinado de circunstancias. Decir que una teoría es un instrumento digno de confianza —esto es, que se confirmarán las predicciones de sucesos observables deducidas de ella— es esencialmente lo mismo que decir que la teoría es verdadera y que las entidades teóricas, inobservables, de las que habla existen. Así, no hay ninguna incompatibilidad entre la tesis de los instrumentalistas y los realistas. Al menos, no hay ninguna incompatibilidad en la medida en que los primeros eviten afirmaciones negativas tales como: "...pero la teoría no está formada por oraciones que sean verdaderas o falsas, y los átomos, electrones, etc., realmente no existen". [3]

[3] Un lúcido examen de los dos o tres puntos de vista adoptados en esta controversia se encontrará en Ernest Nagel, *The Structure of Science* (Nueva York: Harcourt, Brace & World, 1961), Capítulo 6, "The Cognitive Status of Theories".

XXVII

LA ANALITICIDAD EN UN LENGUAJE OBSERVACIONAL

Una de las más viejas y más persistentes dicotomías de la historia de la filosofía es la que se plantea entre verdad analítica y verdad fáctica. Se la ha expresado de muchas maneras diferentes. Kant introdujo la distinción, como vimos en el Capítulo XVIII, en términos de los enunciados que llamaba "analíticos" y "sintéticos". Algunos autores anteriores hablaban de verdades "necesarias" y "contingentes".

En mi opinión, una nítida distinción entre lo analítico y lo sintético es de la mayor importancia para la filosofía de la ciencia. La teoría de la relatividad, por ejemplo, no habría sido creada si Einstein no hubiera comprendido que la estructura del espacio y el tiempo físicos no puede ser determinada sin ensayos físicos. Vio claramente la nítida línea divisoria, que debe tenerse siempre presente, entre la matemática pura, con sus numerosos tipos de geometría lógicamente consistentes, y la física, en la cual sólo el experimento y la observación permiten determinar cuáles son las geometrías que se aplicarán más fructíferamente al mundo físico. Esta distinción entre verdad analítica (que incluye la verdad lógica y matemática) y verdad fáctica es igualmente importante, en la actualidad, en la teoría cuántica, ya que los físicos exploran la naturaleza de las partículas elementales y buscan una teoría del campo que una la mecánica cuántica con la relatividad. En este capítulo y en el siguiente nos ocuparemos de la cuestión concerniente a la manera de dar precisión a esta antigua distinción a través de todo el lenguaje de la ciencia moderna.

Durante muchos años, se consideró útil dividir los términos de un lenguaje científico en tres grupos principales:

1. Los términos lógicos, que incluyen a todos los términos de la matemática pura.
2. Los términos observacionales o términos O.
3. Los términos teóricos o términos T (llamados a veces "construcciones conceptuales").

Es verdad, como hemos destacado en capítulos anteriores, que no hay un límite preciso entre los términos O y los términos T. La elección de una línea divisoria precisa es un tanto arbitraria. Desde un punto de vista práctico, sin embargo, la distinción por lo común es evidente. Todo el mundo estaría de acuerdo en que las palabras que denotan propiedades, como "azul", "duro", "frío", etc., y las que denotan relaciones, como "más caliente", "más pesado", "más brillante" etc., son términos O, mientras que "carga eléctrica", "protón", "campo electromagnético" y otras expresiones similares son términos T referentes a entidades que no es posible observar de manera relativamente simple y directa.

Con respecto a las oraciones del lenguaje de la ciencia, existe una triple división similar:

1. Oraciones lógicas que no contienen términos descriptivos.
2. Oraciones observacionales u oraciones O, que contienen términos O pero no términos T.
3. Oraciones teóricas u oraciones T, que contienen términos T. Las oraciones T son de dos tipos:
   a. Oraciones mixtas, que contienen términos O y términos T.
   b. Oraciones puramente teóricas, que contienen términos T pero no términos O.

Es conveniente dividir el lenguaje total, *L*, de la ciencia en dos partes. Cada una de ellas contiene toda la lógica (inclusive la matemática). Sólo difieren con respecto a sus elementos descriptivos, no lógicos.

1. El lenguaje observacional o lenguaje O (L_O), que contiene oraciones lógicas y oraciones O, pero no términos T.
2. El lenguaje teórico o lenguaje T (L_T), que contiene oraciones

lógicas y oraciones T (con o sin términos O además de los términos T).

Se introducen los términos T en el lenguaje de la ciencia mediante una teoría, *T*, que se basa en dos tipos de postulados: los teóricos, o postulados T, y los de correspondencia, o postulados C. Los postulados T son las leyes de la teoría. Son oraciones T puras. Los postulados C, las reglas de correspondencia, son oraciones mixtas, que combinan términos T con términos O. Como dijimos antes, constituyen lo que Campbell llamaba el diccionario para vincular el lenguaje observacional con el teórico, lo que Reichenbach llamaba definiciones coordinadoras y lo que en la terminología de Bridgman podría llamarse postulados operacionales o reglas operacionales.

Con esta base, pasemos al problema de distinguir la verdad analítica de la verdad fáctica en el lenguaje observacional.

El primer tipo de verdad analítica es la verdad lógica o "verdad L", en nuestra terminología. Una oración es L-verdadera, cuando es verdadera en virtud de su forma y de los significados de los términos lógicos que aparecen en ella. Por ejemplo, la oración "Si ningún soltero es un hombre feliz, entonces ningún hombre feliz es soltero" es L-verdadera porque se puede determinar su verdad si se conocen los significados o la manera de utilizar las palabras lógicas "si", "entonces", "no" y "es", aunque no se conozcan los significados de las palabras descriptivas "soltero", "feliz" y "hombre". Todos los enunciados (principios y teoremas) de la lógica y la matemática son de este tipo. (Frege y Russell demostraron que la matemática pura es reductible a la lógica, aunque algunos puntos de esta reducción aún son objeto de controversia. No examinaremos aquí esta cuestión.)

Por otra parte, como lo ha puesto en claro Willard V. O. Quine, el lenguaje observacional abunda en oraciones que son analíticas en un sentido mucho más amplio que el de ser L-verdaderas. No es posible describir como verdaderas o

falsas estas oraciones si no se comprenden los significados de sus términos descriptivos tanto como los significados de sus términos lógicos. El conocido ejemplo de Quine es: "Ningún soltero está casado." La verdad de esta oración, evidentemente, no depende de los hechos contingentes del mundo; sin embargo, no se la puede considerar verdadera en virtud de su forma lógica solamente. Además de conocer el significado de "no" y "es", es necesario saber qué significan "soltero" y "casado". En este caso, todo el que hable castellano estaría de acuerdo en que "soltero" tiene el mismo significado que "hombre que no está casado". Una vez que se aceptan estos significados, resulta inmediatamente evidente que la oración es verdadera, no a causa de la naturaleza del mundo, sino de los significados que nuestro lenguaje asigna a las palabras descriptivas. Ni siquiera es necesario comprender cabalmente estos significados. Sólo es necesario saber que las dos palabras tienen significados incompatibles, que no se puede describir simultáneamente a un hombre como soltero y como casado.

Quine propuso, y yo apoyo esta propuesta, que se use la expresión "analítico" para significar "lógicamente verdadero" en el sentido amplio, que incluye las oraciones del tipo que acabamos de examinar y las oraciones L-verdaderas. "A-verdadero" es el término que utilizo para la verdad analítica en este sentido amplio. Así, todas las oraciones L-verdaderas son A-verdaderas, pero no todas las oraciones A-verdaderas son L-verdaderas. Una oración L-verdadera es verdadera por su forma lógica solamente. Una oración A-verdadera que no es L-verdadera es verdadera en virtud de los significados asignados a sus términos descriptivos y de los significados de sus términos lógicos. En cambio, la verdad o falsedad de una oración sintética no está determinada por los significados de sus términos, sino por la información fáctica acerca del mundo físico. "Los objetos caen a tierra con una aceleración de 980 centímetros por segundo." No es posible determinar si este enunciado es verdadero o falso

simplemente mediante un examen de su significado. Es necesario realizar una prueba empírica. Tal enunciado tiene "contenido fáctico". Nos dice algo acerca del mundo real.

Ningún lenguaje natural como el castellano, por supuesto, es tan preciso como para que todo el mundo comprenda cada palabra del mismo de igual manera. Por esta razón, es fácil formular oraciones que sean ambiguas con respecto a su analiticidad; el carácter analítico o sintético de tales oraciones es discutible.

Consideremos, por ejemplo, la aserción: "Todos los pájaros carpinteros pelirrojos tienen las cabezas rojas". ¿Es un enunciado analítico o sintético? Al principio, quizás respondamos que es, por supuesto, analítico. "Pájaros carpinteros pelirrojos" *significa* "pájaros carpinteros que tienen las cabezas rojas", de modo que la oración es equivalente a la aserción de que todos los pájaros carpinteros con cabezas rojas tienen cabezas rojas. Tal oración no sólo es A-verdadera, sino también L-verdadera.

Ello será así, *si* el significado de "pájaro carpintero pelirrojo" es tal que "tener cabeza roja" es, de hecho, un componente esencial del significado. ¿Pero es un componente esencial? Un ornitólogo puede dar un significado diferente a "pájaro carpintero pelirrojo". Para él, la expresión puede referirse a una especie de pájaros definida por un cierto tipo de estructura corporal, forma del pico y hábitos de conducta. Puede considerar muy posible que esta especie de pájaros, en alguna región aislada, haya sufrido una mutación que alterara el color de su cabeza y ésta fuera blanca, por ejemplo. Por razones taxonómicas muy atendibles, puede continuar llamando a tales pájaros "pájaros carpinteros pelirrojos", aunque sus cabezas no sean rojas. Constituirían una variante de una especie. Hasta los podría llamar "pájaros carpinteros pelirrojos de cabeza blanca". Por ende, si se interpreta "pájaro carpintero pelirrojo" de tal modo que tener cabeza roja *no* es un componente esencial del significado, la oración es sintética. Es necesario efectuar una inspección empírica de

todos los pájaros carpinteros pelirrojos para determinar si todos ellos, efectivamente, tienen cabezas rojas.

Aun el enunciado "si el Sr. Pérez es soltero, entonces no tiene esposa" podría ser considerado sintético por alguien que interprete ciertas palabras de manera no ortodoxa. Por ejemplo, para un abogado la palabra "esposa" puede tener un significado amplio que incluya el de "esposa consensual". Si un abogado interpreta el término "soltero" en el sentido de un hombre que no está casado legalmente, pero toma la palabra "esposa" en sentido amplio, entonces, evidentemente, la oración es sintética. Es menester investigar la vida privada del Sr. Pérez para determinar si la oración es verdadera o falsa.

Podemos examinar el problema de la analiticidad con respecto a un lenguaje observacional artificial que puede construirse estableciendo reglas precisas. Estas reglas no especifican los significados completos de todas las palabras descriptivas del lenguaje, sino que las relaciones de significación entre ciertas palabras deben ser aclaradas mediante reglas que una vez llamé "postulados de significación", pero que actualmente prefiero llamar, más simplemente, "postulados A" (postulados de analiticidad). Podemos imaginar fácilmente cómo *sería posible* dar especificaciones completas para todas las palabras descriptivas del lenguaje. Por ejemplo, podríamos especificar los significados de "animal", "pájaro" y "pájaro carpintero pelirrojo" mediante las siguientes reglas de designación:

(D1) El término "animal" designa la conjunción de las siguientes propiedades (1)..., (2)..., (3)..., (4)..., (5)..., (aquí se da una lista completa de las propiedades definitorias).

(D2) El término "pájaro" designa la conjunción de las siguientes propiedades (1)..., (2)..., (3)..., (4)..., (5)..., (igual que en D1), más las propiedades adicionales (6)..., (7)..., (8)..., (9)..., (10)... (todas las propiedades necesarias para especificar el significado de "pájaro").

(D3) El término "pájaro carpintero pelirrojo" designa la conjunción de las siguientes propiedades (1)..., (2)..., (5)...,

(igual que en D1), más (6)..., (7)..., (10)... (igual que en D2), más las propiedades adicionales (11)..., (12)..., (13)..., (14)..., (15)... (todas las propiedades necesarias para especificar el significado de "pájaro carpintero pelirrojo").

Si en los espacios indicados por los puntos escribiéramos todas las propiedades requeridas, es evidente que las reglas serían enormemente largas y engorrosas. Sería necesario hacer algo semejante si se insistiera en dar una especificación completa de los significados de todos los términos descriptivos de nuestro lenguaje artificial. Afortunadamente, no es necesario llegar a estos fatigosos extremos. Los postulados A pueden limitarse a especificar las *relaciones de significación* que rigen entre los términos descriptivos del lenguaje. Por ejemplo, para los tres términos indicados, sólo se necesitan dos postulados A.

(A1) Todos los pájaros son animales.
(A2) Todos los pájaros carpinteros pelirrojos son pájaros.

Si se dan las tres reglas D, obviamente los dos postulados A pueden ser deducidos de ella. Pero, puesto que las reglas D son tan engorrosas, no es necesario formularlas cuando el propósito es solamente indicar la estructura analítica de un lenguaje. Sólo es necesario dar los postulados A. Son mucho más simples y suministran base suficiente para establecer en el lenguaje la distinción entre enunciados analíticos y sintéticos.

Supongamos que el lenguaje artificial se basa en el lenguaje natural castellano, pero queremos establecer postulados A para permitir, en todos los casos, la determinación de si una oración dada del lenguaje es o no analítica. En algunos casos, pueden obtenerse los postulados A consultando un diccionario castellano corriente. Consideremos la oración: "Si se arroja una botella por la ventana, la botella es defenestrada." ¿Es analítica o sintética? El postulado A, derivado de la definición del diccionario, dice que "x es defenestrado si y sólo si x es arrojado por una ventana". Es evidente que

la oración es A-verdadera. No es necesario arrojar una botella por una ventana para comprobar si es o no defenestrada. La verdad de la oración se desprende de las relaciones de significación entre sus palabras descriptivas, tal como las especifica el postulado A.

Un diccionario corriente puede ser suficientemente preciso como para guiarnos con respecto a algunas oraciones, pero con respecto a otras será de escasa ayuda. Por ejemplo, consideremos las aserciones tradicionalmente ambiguas: "Todos los hombres son animales racionales" y "todos los hombres son bípedos implumes". La principal dificultad surge aquí de la gran ambigüedad en el significado de "hombre". En nuestro lenguaje artificial, no hay dificultad alguna porque la lista de nuestros postulados A resuelve la cuestión por estipulación. Si deseamos interpretar "hombres" de tal manera que "racionalidad" y "animalidad" sean componentes esenciales del significado de la palabra, entonces "todos los hombres son racionales" y "todos los hombres son animales" se incorporan a los postulados A. Sobre la base de estos postulados A, el enunciado "todos los hombres son animales racionales" es A-verdadero. Por otra parte, si los postulados A para "hombres" sólo se refieren a la estructura de los cuerpos físicos de los hombres, entonces el enunciado "todos los hombres son animales racionales" es sintético. Si no se establecen postulados A análogos para los términos "implume" y "bípedo", esto indica que en nuestro lenguaje los caracteres de implume y de bípedo no son considerados componentes esenciales del significado de "hombres". La aserción "todos los hombres son bípedos implumes" también es sintética, en tal caso. En nuestro lenguaje, un hombre con una sola pierna también sería considerado un hombre. De igual modo, un hombre al que le crecieran plumas en la cabeza seguiría siendo considerado un hombre.

El punto importante que es necesario comprender aquí es que cuanto más precisa sea la lista de postulados A, tanto mayor precisión puede darse a la distinción entre oraciones

analíticas y oraciones sintéticas en nuestro lenguaje. En la medida en que las reglas sean vagas, el lenguaje construido contendrá sentencias que serán brumosas con respecto a su analiticidad. Toda indeterminación que subsista —y este punto es esencial— no se deberá a falta de claridad en la comprensión de la dicotomía entre enunciados analíticos y sintéticos. Se deberá a confusiones en la comprensión de los significados de las palabras descriptivas del lenguaje.

Es menester recordar siempre que los postulados A no dicen nada acerca del mundo real, aunque a veces pueda parecer lo contrario. Consideremos, por ejemplo, la expresión "más caliente". Supongamos que queremos establecer un postulado A para que la relación designada por esta expresión sea asimétrica. "Para todo x y todo y, si x es más caliente que y entonces y no es más caliente que x." Si alguien dice que ha descubierto dos objetos A y B, de tal naturaleza que A es más caliente que B y B es más caliente que A, no responderíamos: "¡Qué sorprendente! ¡Qué maravilloso descubrimiento!" Más bien, responderíamos: "Usted y yo debemos interpretar de manera diferente la expresión 'más caliente'. Para mí, significa una relación asimétrica; por lo tanto, la situación que usted halló no puede ser descripta como usted lo ha hecho." El postulado A que especifica el carácter asimétrico de la relación "más caliente" se refiere exclusivamente al significado de la palabra tal como se la usa en nuestro lenguaje. No dice nada acerca de la naturaleza del mundo.

En años recientes, la concepción de que es posible establecer una distinción nítida entre los enunciados analíticos y los sintéticos ha sido atacada enérgicamente por Quine, Morton White y otros.[1] Se encontrarán mis opiniones sobre

[1] El ataque de Quine se encuentra en su artículo "Two Dogmas of Empiricism", *Philosophical Review*, 60 (1951), 20-43; reimpreso en *From a Logical Point of View* (Cambridge: Harvard University Press, 1953; Nueva York: Harper Torchbooks, 1963). Ver también su ensayo "Carnap and Logical Truth" en Paul Arthur Schilpp, ed., *The Philosophy of Rudolf Carnap* (La Salle, Illinois: Open Court, 1963),

esta cuestión en dos artículos reimpresos en el apéndice de la segunda edición (1956) de mi libro ya citado *Meaning and Necessity*. El primero de estos artículos, sobre los "Postulados de Significación", responde a Quine demostrando de una manera formal (como he indicado aquí de manera no formal) que es posible dar precisión a dicha distinción en un lenguaje observacional artificial, mediante el simple expediente de agregar postulados A a las reglas del lenguaje. En mi segundo artículo, "Significado y Sinonimia en los Lenguajes Naturales", indico cómo puede establecerse la distinción, no ya para un lenguaje artificial, sino para un lenguaje común, como el castellano cotidiano. En este caso, la distinción debe basarse en una investigación empírica de los hábitos del habla. Esto plantea nuevos problemas, que examino en ese artículo pero que no consideraré aquí.

Hasta ahora, hemos examinado la analiticidad sólo con referencia a los lenguajes observacionales: el lenguaje observacional de la vida cotidiana, el de la ciencia y el lenguaje observacional artificial de un filósofo de la ciencia. Tengo la convicción de que se ha resuelto el problema de distinguir, en tales lenguajes, las aserciones analíticas de las sintéticas. Además, tengo la convicción de que casi todos los científicos activos estarían de acuerdo en que dicha distinción es útil en el lenguaje observacional de la ciencia. Pero cuando tratamos de aplicar la dicotomía al lenguaje *teórico* de la ciencia, nos encontramos con dificultades enormes. En el Capítulo 28, consideraremos algunas de estas dificultades y una manera posible de superarlas.

---

pp. 385-406, y mi respuesta, pp. 915-922. Con respecto a las animadversiones de Morton White, ver su artículo "The Analytic and Synthetic: An Untenable Dualism", en Sidney Hook, ed., *John Dewey* (Nueva York: Dial, 1950), y la Parte 2 de la obra de White *Toward Reunion in Philosophy* (Cambridge: Harvard University Press, 1956; Nueva York: Atheneum Paperback, 1963). Una lista de algunos artículos importantes escritos en respuesta a Quine se encontrará en Paul Edwards y Arthur Pap, eds., *A Modern Introduction to Philosophy* (Glencoe, Illinois: The Free Press, 1962), p. 89.

XXVIII

LA ANALITICIDAD EN UN LENGUAJE TEÓRICO

Antes de explicar cómo creo yo que puede establecerse claramente la distinción entre enunciados analíticos y enunciados sintéticos en el lenguaje teórico de la ciencia, es importante comprender las grandes dificultades que se nos plantean y discernir su origen en el hecho de que no es posible dar interpretaciones completas de los términos T (términos teóricos). En el lenguaje observacional, este problema no se plantea. Se supone que todas las relaciones de significación entre los términos descriptivos del lenguaje observacional son expresadas mediante adecuados postulados A, como explicamos en el capítulo anterior. Pero con respecto a los términos T, la situación es muy diferente. No existe ninguna interpretación empírica completa de términos como "electrón", "masa" y "campo electromagnético". Es cierto que puede observarse un rastro en una cámara de burbujas y que se lo puede explicar como producido por un electrón que atraviesa la cámara. Pero tales observaciones sólo suministran interpretaciones empíricas parciales e indirectas de los términos T con los que están vinculadas.

Consideremos, por ejemplo, el término teórico "temperatura" tal como se lo usa en la teoría cinética de las moléculas. Hay postulados C (reglas de correspondencia) que vinculan este término con la construcción y el uso de un termómetro, pongamos por caso. Después de introducir un termómetro en un líquido, se efectúa una lectura en la escala. Los postulados C relacionan este procedimiento con el término T "temperatura" de tal manera que las lecturas de la escala suministran una interpretación parcial del término.

Es parcial porque no se puede utilizar esta interpretación particular de "temperatura" para todas las oraciones de la teoría en las que dicho término aparece. Un termómetro común sólo es utilizable dentro de un intervalo estrecho de la escala de temperaturas. Hay temperaturas por debajo de las cuales todo líquido de prueba se congelaría y temperaturas por encima de las cuales todo líquido de prueba se evaporaría. Para tales temperaturas, es menester usar métodos de medición totalmente diferentes. Cada uno de estos métodos está vinculado mediante postulados C con el concepto teórico de "temperatura", pero no puede decirse que esto agota el significado empírico de "temperatura". Las observaciones futuras pueden brindar nuevos postulados C que enriquezcan aun más la interpretación empírica del concepto.

Hempel, en la Sección 7 de su monografía "Methods of Concept Formation in Science" ("Métodos para la Formación de Conceptos en la Ciencia", *Encyclopedia of Unified Science*, 1953), ha trazado un cuadro memorable de la estructura de una teoría.

Una teoría científica, pues, puede ser comparada con una red espacial compleja: sus términos están representados por los nudos, mientras que los hilos que unen a éstos corresponden, en parte, a las definiciones y, en parte, a las hipótesis fundamentales y derivadas que contiene la teoría. Todo el sistema flota, por decir así, por encima del plano de observación y está anclado en él mediante reglas de interpretación. A éstas se las puede considerar como cuerdas que no forman parte de la red, pero vinculan ciertas partes de ésta con lugares específicos del plano de observación. Gracias a estas conexiones, interpretativas, la red puede funcionar como teoría científica: a partir de ciertos datos observacionales, podemos ascender, por una cuerda interpretativa, a un punto de la red teórica, de aquí pasar, mediante definiciones e hipótesis, a otros puntos en los cuales otras cuerdas interpretativas permiten descender al plano de observación.[1]

[1] La cita está tomada del trabajo de Carl G. Hempel, "Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science", publicado en *International Encyclopedia of Unified Science*, Vol. 2, Nº 7 (Chicago: University of Chicago Press, 1952), pp. 23-38.

El problema es hallar una manera de distinguir, en el lenguaje que se refiere a esa red compleja, las oraciones analíticas de las sintéticas. Es fácil identificar las oraciones L-verdaderas, esto es, las que son verdaderas en virtud de su forma lógica. "Si todos los electrones tienen momentos magnéticos y la partícula *x* no tiene momento magnético, entonces la partícula *x* no es un electrón." Evidentemente, esta oración es L-verdadera. No es necesario saber nada acerca de los significados de sus palabras descriptivas para ver que es verdadera. Pero, ¿cómo establecer la distinción entre oraciones analíticas (verdaderas en virtud de los significados de sus términos, inclusive sus términos descriptivos) y oraciones sintéticas (cuya verdad no es posible determinar sin observar el mundo real)?

Para reconocer los enunciados analíticos en un lenguaje teórico, es necesario disponer de postulados A que especifiquen las relaciones de significación que rigen entre los términos teóricos. Un enunciado es analítico si es una consecuencia lógica de los postulados A. Debe ser verdadero de una manera tal que la determinación de su verdad no dependa de la observación del mundo real; debe estar desprovisto de contenido fáctico. Debe ser verdadero exclusivamente en virtud de los significados de sus términos, así como el enunciado observacional "ningún soltero está casado" es verdadero en virtud de los significados de "soltero" y "casado". Puede darse precisión a estos significados mediante reglas del lenguaje observacional. ¿Cómo es posible formular postulados A semejantes para identificar los enunciados analíticos de un lenguaje teórico que contiene términos teóricos de los cuales no hay interpretaciones completas?

Quizás lo primero que se nos ocurra es que sólo los postulados T podrían servir como postulados A. Es cierto que se puede construir una teoría deductiva combinando postulados T con la lógica y la matemática, pero el resultado es un sistema deductivo abstracto en el cual los términos teó-

ricos ni siquiera tienen una interpretación parcial. La geometría euclidiana es un ejemplo conocido de esto. Es una estructura no interpretada de la matemática pura. Para transformarla en una teoría de la ciencia empírica, es menester interpretar, al menos parcialmente, sus términos descriptivos. Esto significa que es necesario dar significados empíricos a sus términos, lo cual se logra, claro está, mediante reglas de correspondencia que vinculen sus términos primitivos con diversos aspectos del mundo físico. De este modo, se puede transformar la geometría euclidiana en geometría física. Decimos que la luz se mueve en "línea recta", que dos hilos del retículo de un telescopio se cortan en un "punto" y que los planetas describen "elipses" alrededor del Sol. Mientras no se interpreta la estructura matemática abstracta (al menos parcialmente) mediante postulados C, el problema semántico de distinguir entre oraciones analíticas y oraciones sintéticas ni siquiera se plantea. Los postulados T de una teoría no pueden ser utilizados como postulados A porque no dan significado empírico a los términos T.

¿Pueden ser utilizados los postulados C para obtener postulados A? Por supuesto, no es posible tomar solamente los postulados C. Para obtener la interpretación más completa posible (aunque, de todos modos, siempre será parcial) de los términos T, es necesario tomar la teoría en su totalidad, con sus postulados T y C combinados. Supongamos, pues, que presuponemos la teoría en su totalidad. ¿Los postulados T y C combinados nos brindarán los postulados A que buscamos? No; ahora hemos presupuesto *demasiado*. En realidad, hemos obtenido todos los significados empíricos que podemos lograr para nuestros términos teóricos, pero también hemos obtenido información fáctica. La conjunción de postulados T y C, por lo tanto, nos brinda enunciados sintéticos y, como hemos visto, tales enunciados no pueden suministrarnos postulados A.

Aclararemos lo anterior mediante un ejemplo. Supongamos que nos servimos de los postulados T y C de la teoría

general de la relatividad como postulados A para identificar las oraciones analíticas de la teoría. Sobre la base de ciertos postulados T y C, junto con la lógica y la matemática, deducimos que el campo gravitacional del Sol provocará una deflexión de la luz proveniente de las estrellas. ¿Podemos decir que esta conclusión es analítica, que sólo es verdadera en virtud de los significados empíricos asignados a todos los términos descriptivos? No podemos, porque la teoría general de la relatividad hace predicciones condicionales acerca del mundo, predicciones que las pruebas empíricas pueden confirmar o refutar.

Consideremos, por ejemplo, el enunciado: "Estas dos placas fotográficas corresponden al mismo conjunto de estrellas. La primera fue expuesta durante un eclipse de sol, cuando el disco eclipsado del Sol se hallaba dentro del conjunto estelar. La segunda fue expuesta cuando el Sol no aparecía cerca de éste." Al anterior lo llamaremos enunciado *A*. El enunciado *B* es: "En la primera placa, las imágenes de estrellas muy cercanas al halo del Sol eclipsado se desplazarán ligeramente de sus posiciones con respecto a las que presentan en la segunda placa, y el desplazamiento será tal que aparecerán más lejos del Sol." La aserción condicional "si *A*, entonces *B*", es un enunciado que puede ser deducido de la teoría general de la relatividad. Pero es también un enunciado que puede ser puesto a prueba por la observación. En realidad, como indicamos en el Capítulo 16, Findlay Freundlich efectuó en 1919 una prueba histórica de esta aserción. Sabía que *A* era verdadero. Después de cuidadosas mediciones de las manchas de luz de las dos placas, halló que *B* también era verdadero. Si hubiera encontrado que *B* era falso, el condicional "si *A*, entonces *B*" hubiera sido refutado. Con esto, a su vez, se habría refutado la teoría de la relatividad, de la cual se dedujo "Si *A*, entonces *B*". Por lo tanto, hay contenido fáctico en la aserción de la teoría según la cual los campos gravitacionales provocan la deflexión de la luz estelar.

Para expresar más formalmente el mismo argumento, después de especificar los postulados T y C de la teoría de la relatividad, es posible, sobre la base de un conjunto dado de premisas, *A*, del lenguaje observacional, deducir otro conjunto de oraciones, *B*, también del lenguaje observacional, que no pueden ser deducidas sin *TC*, la teoría total. Por ende, el enunciado "si *A*, entonces *B*" es una consecuencia lógica de la conjunción de *T* y *C*. Si *T* y *C* fueran tomados como postulados A, sería necesario considerar el enunciado "si *A*, entonces *B*" como analítico. Pero, evidentemente no es analítico. Es un enunciado sintético del lenguaje observacional. Si la observación del mundo real mostrase que *A* es verdadero y *B* falso, quedaría refutado.

Quine y otros filósofos de la ciencia han sostenido que, en este caso, las dificultades son tan grandes que no es posible aplicar al lenguaje teórico de la ciencia la dicotomía analítico-sintética, en el sentido habitual. Más recientemente esta tesis ha sido presentada con gran claridad por Hempel.[2] Hempel está dispuesto, quizás con vacilaciones, a aceptar la dicotomía con respecto al lenguaje observacional. En lo concerniente a su utilidad con respecto al lenguaje teórico, se hace eco del vigoroso escepticismo de Quine. El doble papel de los postulados T y C, sostiene, hace totalmente esquivo al concepto de verdad analítica con respecto a un lenguaje teórico. Es difícil imaginar, piensa Hempel, que exista una manera de separar estas dos funciones de los postulados T y C de modo que pueda decirse que una parte de ellos contribuye al significado —de modo que las oraciones que se basan en esta parte sean verdaderas, cuando lo son, en virtud de su significado solamente— mientras que las otras oraciones son fácticas.

[2] Ver los dos capítulos de Hempel: "The Teoretician's Dilemma" en Herbert Feigl, Michael Scriven, y Grover Maxwell, eds., *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Minneapolis, Minn.: University of Minnesota Press, 1956), Vol. II, e "Implicationes of Carnap's Work for the Philosophy of Science" en Paul Arthur Schilpp, ed., *The Philosophy of Rudolf Carnap* (La Salle, Illinois: Open Court, 1963).

Una manera extrema de resolver o, más bien, evitar todos los inquietantes problemas vinculados con los términos teóricos es la propuesta por Ramsey. Como vimos en el Capítulo 26, es posible enunciar todo el contenido observacional de una teoría en una oración llamada la oración de Ramsey, ^{R}TC, en la cual sólo aparecen términos observacionales y lógicos. Puede decirse que se hace desaparecer los términos lógicos mediante una cuantificación. Puesto que no hay términos teóricos, no hay lenguaje teórico. Así, desaparece el problema de definir la analiticidad en un lenguaje teórico. Sin embargo, es una solución demasiado radical. Como vimos antes, el abandono de los términos teóricos de la ciencia da origen a grandes complejidades e inconvenientes. Los términos teóricos simplifican enormemente la tarea de formular leyes y, aunque sólo sea por esta razón, no se los puede eliminar del lenguaje de la ciencia.

Creo que hay una manera de resolver el problema apelando a la oración de Ramsey, pero haciéndolo de manera que no nos veamos obligados a dar el paso final y extremo de Ramsey. Estableciendo ciertas distinciones, es posible establecer la dicotomía buscada entre la verdad analítica y la sintética en el lenguaje teórico, conservando, al mismo tiempo, todos los términos y oraciones teóricos de una teoría.

Hasta ahora, hemos considerado que una teoría está formada por dos "oraciones": la oración *T*, la conjunción de todos los postulados T, y la oración *C*, la conjunción de todos los postulados C. La teoría *TC* es la conjunción de ambas oraciones.

Propondré otra manera de dividir la teoría *TC* en dos oraciones que, tomadas conjuntamente, son equivalentes a la teoría. Dividiremos la teoría en una oración A_T y una oración F_T. La oración A_T hará las veces del postulado A para todos los términos teóricos de la teoría. Por supuesto, debe estar completamente desprovista de contenido fáctico.

La oración F_T será la que exprese todo el contenido observacional o fáctico de la teoría. Como hemos visto, la oración de Ramsey ^RTC logra el mismo resultado. Expresa en un lenguaje observacional ampliado hasta incluir toda la matemática todo lo que la teoría dice acerca del mundo real. No da interpretaciones de los términos teóricos porque estos términos no aparecen en la oración. Así, se toma la oración de Ramsey ^RTC como postulado fáctico F_T.

Las dos oraciones F_T y A_T, tomadas conjuntamente, deben implicar lógicamente la teoría total TC. ¿Cómo se puede formular una oración A_T que cumpla con estos requisitos? Dadas dos oraciones cualesquiera S_1 y S_2, la oración más débil que, junto con S_1, implica lógicamente a S_2 es la aserción condicional "Si S_1, entonces S_2". Puede expresarse esto en forma simbólica utilizando el conocido símbolo de la implicación material: "$S_1 \supset S_2$". Así, la manera más simple de formular un postulado analítico A_T para una teoría TC es:

$$(A_T) \qquad {}^RTC \supset TC$$

Puede demostrarse fácilmente que esta oración es fácticamente vacía. No dice nada acerca del mundo. Todo el contenido fáctico está en la oración F_T, que es la oración de Ramsey ^RTC. La oración A_T simplemente afirma que *si* la oración de Ramsey es verdadera, entonces debemos entender los términos teóricos de tal manera que toda la teoría sea verdadera. Es una oración puramente analítica, porque su verdad semántica se basa en los significados atribuidos a los términos teóricos. Esta afirmación, junto con la oración de Ramsey, L-implica toda la teoría.

Veamos cómo este curioso postulado A, $^RTC \supset TC$ brinda una manera de distinguir entre enunciados analíticos y enunciados sintéticos en el lenguaje teórico. La oración de Ramsey ^RTC es sintética. Su verdad sólo puede ser determinada mediante la observación concreta del mundo. Pero todo enunciado L-implicado por el postulado A dado será analítico.

En este caso, como en el de las oraciones analíticas del lenguaje observacional, hay un sentido vago en el cual el postulado A *dice* algo acerca del mundo. Pero, en un sentido estricto, no es así. El postulado A declara que *si* existen entidades (a las que aluden los cuantificadores existenciales de la oración de Ramsey) de tal tipo que estén vinculadas por todas las relaciones expresadas en los postulados teóricos de la teoría y que se hallen conectadas con entidades observacionales por todas las relaciones especificadas por los postulados de correspondencia de la teoría, entonces ésta es verdadera. El postulado A *parece* decir algo acerca del mundo, pero en realidad no dice nada. No nos dice si la teoría es verdadera. No nos dice que el mundo es como lo retrata la teoría. Dice solamente que *si* el mundo fuera así, entonces debe entenderse que los términos teóricos satisfacen la teoría.

En el Capítulo 26, consideramos un ejemplo de una teoría con seis conceptos teóricos, a saber, dos clases y cuatro relaciones. Dimos una formulación esquemática (cuyo contexto estaba indicado simplemente por puntos) de la teoría *TC* y de su oración de Ramsey ${}^{R}TC$. Volviendo a este ejemplo, el postulado A de esta teoría puede ser formulado del siguiente modo:

$$(A_T)\ (\exists C_1)\ (\exists C_2)\ (\exists R_1)\ (\exists R_2)\ (\exists R_3)\ (\exists R_4)\ [\ldots C_1 \ldots C_2 \ldots R_1 \ldots R_2 \ldots R_3 \ldots R_4 \ldots; \ldots R_1 \ldots O_1 \ldots O_2 \ldots O_3 \ldots R_2 \ldots O_4 \ldots O_m \ldots] \supset$$

$$[\ldots \text{Mol} \ldots \text{Himol} \ldots \text{Temp} \ldots \text{Pres} \ldots \text{Masa} \ldots \text{Vel} \ldots; \ldots \text{Temp} \ldots O_1 \ldots O_2 \ldots O_3 \ldots \text{Pres} \ldots O_4 \ldots O_m \ldots].$$

Aquí se dice que, si el mundo es tal que existe al menos un conjunto de seis entidades (dos clases y cuatro relaciones) que estén relacionadas entre sí y con las entidades observacionales $O_1, O_2, \ldots, O_m$, como lo especifica la teoría, entonces las entidades teóricas Mol, Himol, Temp, Pres, Masa y Vel forman un conjunto de seis entidades que satis-

face la teoría. Es importante comprender que no se trata de un enunciado fáctico que afirme que, en las condiciones estipuladas, seis entidades especificadas satisfacen, de hecho, la teoría. Los seis términos teóricos no nombran seis entidades específicas. Antes de establecer los postulados A_T, estos términos no tienen interpretación, ni siquiera parcial. La única interpretación que reciben de la teoría es la interpretación parcial que obtienen *a través de este postulado* A. Así, el postulado dice, en efecto, que si hay uno o más conjuntos de seis entidades que satisfagan la teoría, entonces los seis términos teóricos deben ser interpretados como denotando seis entidades que forman un conjunto de este tipo. Si hay, de hecho, conjuntos de seis entidades de este tipo, entonces el postulado da una interpretación parcial de los términos teóricos limitando los conjuntos admitidos a los de este tipo. Por otra parte, si no hay conjuntos de este tipo —en otras palabras, si la oración de Ramsey resulta falsa—, entonces el postulado es verdadero independientemente de su interpretación (porque, si "A" es falso, "$A \supset B$" es verdadero). Por consiguiente, no da siquiera una interpretación parcial de los términos teóricos.

Una vez que se ha comprendido todo esto cabalmente, no hay ningún obstáculo para tomar el enunciado condicional $^{R}TC \supset TC$ como postulado A para TC de la misma manera que se toman postulados A en el lenguaje observacional. Así como un postulado A del lenguaje observacional nos dice algo acerca del significado del término "más caliente", del mismo modo el postulado A para el lenguaje teórico nos da alguna información acerca del significado de términos teóricos como "electrón", y "campo electromagnético". Esta información, a su vez, nos permite establecer que ciertas oraciones teóricas son analíticas, a saber, las que se deducen del postulado analítico A_T.

Ahora es posible enunciar con precisión qué se entiende por verdad A en el lenguaje total de la ciencia. Una oración es A-verdadera si está L-implicada por los postulados A

combinados, esto es, por los postulados A del lenguaje observacional junto con el postulado A de cualquier lenguaje teórico dado. Una oración es A-falsa si su negación es A-verdadera. Si no es A-verdadera ni A-falsa, es sintética. Utilizo la expresión "verdad P" —verdad basada en los postulados— para indicar el tipo de verdad que poseen las oraciones si y sólo si están L-implicadas por los postulados, o sea, el postulado F (oración de Ramsey), junto con los postulados A observacionales y teóricos. En otras palabras, la verdad P se basa en los tres postulados F_T, A_O y A_T. Pero, puesto que F_T y A_T juntos son equivalentes a TC, la forma original de la teoría, es igualmente correcto representar todos los postulados juntos como TC y A_O.

Sobre la base de los diversos tipos de verdad que hemos definido y los correspondientes tipos de falsedad, se llega a una clasificación general de las oraciones de un lenguaje científico. Se la puede diagramar como se ve en la Figura 28-1. Esta clasificación atraviesa la anterior división del len-

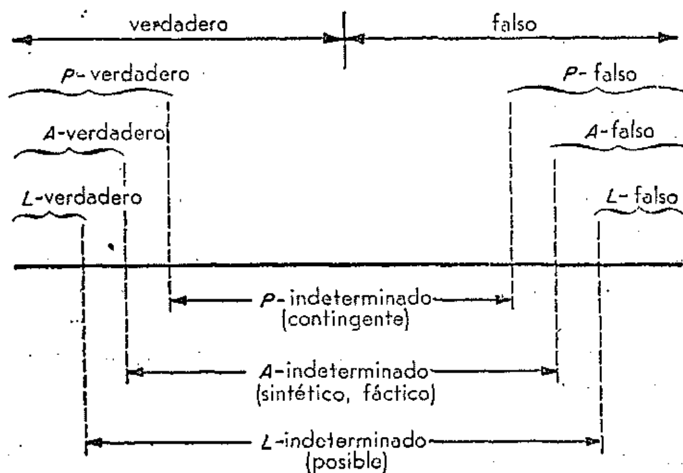


Figura 28-1.

guaje en oraciones lógicas, observacionales, teóricas y mixtas, basada en los tipos de términos que aparecen en las oraciones. Como observará el lector, se indica el término tradicional "sintético" como una alternativa a "A-indeterminado"; esto parece natural, ya que se usó el término "A-verdadero" para el concepto definido como una explicación del término habitual "analítico" (o "analíticamente verdadero"). Por otra parte, el término "P-indeterminado" se aplica a una clase más restringida, a saber, a las oraciones A-indeterminadas (o sintéticas) cuya verdad o falsedad no está determinada siquiera por los postulados de la teoría *TC*, como por ejemplo, las leyes básicas de la física o de algún otro campo de la ciencia. Para este caso, se sugiere como alternativa el término "contingente".

No pretendo ser dogmático con respecto a este esquema de clasificación ni, en particular, a la definición de verdad A basada en el postulado A propuesto. Más bien, los propongo como intento de solución al problema de definir la analiticidad para el lenguaje teórico. Aunque nunca compartí el pesimismo de Quine y Hempel, siempre admití que se trata de un serio problema y que yo no podía entrever una solución satisfactoria del mismo. Durante un tiempo, pensé que quizás tendríamos que resignarnos a considerar una oración que contuviera términos teóricos y no contuviera ningún término observacional como analítica sólo en la condición más restringida y trivial de que sea L-verdadera. Por ejemplo: "Una partícula es un electrón o no es un electrón." Finalmente, después de muchos años de búsqueda, hallé este nuevo enfoque con el nuevo postulado A.[3] Todavía no se han descubierto dificultades en este enfoque. Ahora confío en que haya una solución y en que, si surgen dificultades, será posible superarlas.

[3] Se hallará una presentación más formal de este enfoque en mi artículo de 1958 citado en el Capítulo 26, nota 2, y en mi respuesta a Hempel en Schilpp, op. cit., pp. 958-966.

Sexta Parte

MÁS ALLÁ DEL DETERMINISMO

XXIX

LEYES ESTADÍSTICAS

En el pasado, los filósofos de la ciencia se han ocupado mucho de la cuestión: "¿Cuál es la naturaleza de la causalidad?" En capítulos anteriores, he tratado de poner en claro la razón por la cual no es esta la mejor manera de formular el problema. Sea cual fuere el tipo de causalidad que haya en el mundo, ella está expresada por las leyes de la ciencia. Si queremos estudiar la causalidad, sólo podemos hacerlo examinando esas leyes, estudiando las formas en las que se expresan y en las que se confirman o refutan por la experimentación.

Al examinar las leyes de la ciencia, consideramos conveniente distinguir las leyes empíricas, que tratan de observables, de las leyes teóricas, que se refieren a inobservables. Vimos que, si bien no hay una línea precisa de separación entre observables e inobservables ni, por lo tanto, una línea precisa de separación entre las leyes empíricas y las teóricas, la distinción es útil, sin embargo. Otra distinción importante y útil, que pasa a través de las leyes empíricas y las leyes teóricas, es la distinción entre leyes deterministas y leyes estadísticas. Ya hemos encontrado antes esta distinción, pero en este capítulo la examinaremos con mayor detalle.

Una ley determinista dice que, en ciertas condiciones, se producirán ciertos sucesos. Como hemos visto, una ley de este tipo puede ser enunciada en términos cualitativos o cuantitativos. La aserción según la cual, cuando se calienta una barra de hierro, su longitud aumenta, tiene carácter cualitativo. La aserción según la cual, cuando se

calienta la barra hasta determinada temperatura, su longitud aumenta en una cantidad determinada, es una aserción cuantitativa. Una ley determinista cuantitativa siempre declara que, si ciertas magnitudes tienen determinados valores, otra magnitud (o una de las anteriores magnitudes en un momento diferente) tendrá determinado valor. En resumen, la ley expresa una relación funcional entre los valores de dos o más magnitudes.

Una ley estadística, en cambio, sólo enuncia una distribución probabilística de los valores de una magnitud en casos individuales. Sólo da el valor medio de una magnitud en una clase formada por muchos casos. Por ejemplo, una ley estadística declara que, si se echa a rodar un dado cúbico sesenta veces, cabe esperar que una cara determinada salga alrededor de diez de los tiros. La ley no predice lo que sucederá en un tiro cualquiera, ni dice lo que sucederá con certeza en sesenta tiros. Afirma que, si se arroja el dado muchas veces, cabe esperar que cada cara salga aproximadamente el mismo número de veces que cualquier otra cara. Puesto que hay seis caras igualmente probables, la probabilidad de que salga una de ellas, es 1/6. Aquí se utiliza la probabilidad en un sentido estadístico, para significar la frecuencia relativa a la larga, y no en el sentido lógico o inductivo al cual llamo grado de confirmación.

Las leyes estadísticas eran bastante comunes en el siglo XIX, pero ningún físico imaginó por entonces que tales leyes indicaran una ausencia de determinismo en las leyes básicas de la naturaleza. Los físicos suponían que la elaboración de leyes estadísticas se debía a razones de conveniencia o a que no se disponía de conocimiento suficiente para describir una situación de manera determinista.

Los informes de un gobierno después de un censo de población son ejemplos conocidos de enunciados expresados en forma estadística por razones de conveniencia, y no por ignorancia. Durante un censo, el gobierno trata de obtener de cada individuo un informe de su edad, sexo,

raza, lugar de nacimiento, número de personas que dependen de él, estado de salud, etc. Mediante un cuidadoso registro de todos estos hechos, el gobierno está en condiciones de dar a conocer una valiosa información estadística. (En épocas anteriores, el recuento y el cálculo se hacían a mano. Habitualmente, había un intervalo de diez años entre un censo y el siguiente; y generalmente, en la época en la que se iniciaba un nuevo censo, todavía no se habían completado los cálculos del anterior. Actualmente, se colocan los datos en tarjetas perforadas, y las computadoras realizan la labor rápidamente.) Los datos revelan que cierto porcentaje de individuos tiene más de sesenta años de edad, cierto porcentaje son médicos, cierto porcentaje tiene tuberculosis, etc. Los enunciados estadísticos de este género son necesarios para poder manipular de manera conveniente un enorme número de datos. Esto no significa que no se disponga de los datos individuales; sólo significa que sería sumamente engorroso expresarlos como datos individuales. En lugar de expresar millones de enunciados particulares tales como: "...y hay también una Sra. Pérez, de Santa Fe, nacida en Rosario, que tiene 75 años de edad, cuatro hijos y diez nietos", se comprime la información en la forma de enunciados estadísticos breves. Se lo hace por razones de conveniencia, aunque haya un registro de todos los hechos subyacentes.

A veces, no se dispone de los datos particulares, pero es posible obtenerlos. Por ejemplo, en lugar de hacer un censo completo de todo individuo de una gran población, se investiga solamente una muestra representativa. Si la muestra indica que determinado porcentaje de la población es propietaria de sus casas, puede llegarse a la conclusión de que aproximadamente el mismo porcentaje de la población total es propietaria de sus casas. Sería posible interrogar a cada individuo, pero en lugar de invertir el tiempo y el dinero que exige esta labor, se hace una inspección de la muestra. Si se elige la muestra cuidadosamente, de modo

que haya buenas razones para considerarla representativa, es posible obtener buenas estimaciones generales.

Hasta en las ciencias físicas y biológicas frecuentemente conviene utilizar enunciados estadísticos, aunque se conozcan los datos individuales o aunque no sea difícil obtenerlos. Un botánico puede descubrir que unas mil plantas, aproximadamente, con capullos rojos estuvieron sometidas a ciertas condiciones; en la siguiente generación de plantas, alrededor del 75 % de los capullos eran blancos en lugar de rojos. El botánico puede conocer el número exacto de capullos rojos y blancos o, si no lo sabe, puede obtener la cifra haciendo recuentos exactos. Pero si no tiene necesidad de tal exactitud, puede hallar más conveniente expresar los resultados en la forma de un porcentaje aproximado.

A veces, es sumamente difícil y hasta imposible obtener una información exacta de casos individuales, aunque sea fácil discernir cómo se la *podría* obtener. Por ejemplo, si pudiéramos medir todas las magnitudes que intervienen en la caída de un dado —su posición exacta en el momento en que abandona la mano, las velocidades exactas que se le imparten, su peso y elasticidad, la naturaleza de la superficie contra la cual choca, etc.— sería posible predecir exactamente la posición del dado al llegar al reposo. Puesto que actualmente no se dispone de aparatos para realizar tales mediciones, debemos contentarnos con una ley estadística que exprese una frecuencia de largo alcance.

En el siglo XIX la teoría cinética de los gases condujo a la formulación de muchas leyes probabilísticas en el campo de la llamada mecánica estadística. Si cierta cantidad de oxígeno, por ejemplo, está sujeta a una presión y una temperatura determinadas, habrá una cierta distribución de la velocidad de sus moléculas. A esta distribución se la llama la ley de Maxwell-Boltzmann. Ella afirma que, para cada uno de los tres componentes de la velocidad, la distribución probabilística es la llamada función normal (o

gaussiana), representada por la conocida curva en forma de campana. Es una ley estadística acerca de una situación en la cual los datos concernientes a cada molécula individual son técnicamente imposibles de obtener. En este caso, y este punto es muy importante, la ignorancia en cuestión es más profunda que la implicada en los ejemplos anteriores. Aun en el caso del dado, es concebible que sea posible alguna vez construir instrumentos para analizar todos los hechos atinentes al caso. Los datos podrían ser introducidos en una computadora electrónica y antes de que el dado dejara de rodar podría comunicar el resultado: "será un seis". Pero con respecto a las moléculas de un gas, no hay ninguna técnica conocida mediante la cual sea posible medir la dirección y la velocidad de cada molécula individual y analizar luego los resultados para ver si se cumple la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann. Los físicos formularon esta ley como una microley, expresada en la teoría de los gases y confirmada sometiendo a prueba diversas consecuencias que se desprenden de la ley. Tales leyes estadísticas eran comunes, en el siglo XIX, en los campos en los cuales era imposible obtener datos individuales. En la actualidad, se utilizan leyes de este tipo en todas las ramas de la ciencia, especialmente en las ciencias biológicas y sociales.

Los físicos del siglo XIX eran plenamente conscientes de que las leyes probabilísticas de los gases o las leyes referentes a la conducta humana ocultaban una ignorancia más profunda que la implicada en el lanzamiento de un dado. Sin embargo, estaban convencidos de que no era imposible obtener tal información, *en principio*. Sin duda, no se disponía de ningún medio técnico para medir moléculas individuales, pero esta era solamente una infortunada limitación del poder de las herramientas disponibles. En un microscopio, el físico podía ver pequeñas partículas suspendidas en un líquido danzando erráticamente al ser empujadas de uno u otro lado por los choques con moléculas

invisibles. Con instrumentos más perfeccionados, fue posible observar partículas cada vez más pequeñas. Quizás en el futuro se construyan aparatos para medir las posiciones y velocidades de moléculas individuales.

Por supuesto, existen serias limitaciones ópticas. Los físicos del siglo XIX también sabían que, cuando una partícula no es mayor que la longitud de onda de la luz visible, no es posible verla en ningún tipo concebible de microscopio óptico. Pero esto no excluía la posibilidad de crear otros tipos de instrumentos que pudieran medir partículas menores que la longitud de onda de la luz. En realidad, los microscopios electrónicos de la actualidad permiten "ver" objetos que están por debajo del límite teórico de los microscopios ópticos. Los físicos del siglo XIX estaban convencidos de que, en principio, no hay ningún límite a la precisión con la cual es posible realizar observaciones de objetos cada vez más pequeños.

También comprendían que ninguna observación es *completamente* precisa. Hay siempre un elemento de incertidumbre. En este sentido, *todas* las leyes de la ciencia son estadísticas; pero es un sentido trivial. El punto importante es que siempre puede aumentarse la precisión. Actualmente, decían los físicos del siglo XIX, es posible medir cualquier cosa con una precisión de dos dígitos decimales; dentro de unas décadas, quizás se llegue a una precisión de veinte o cien dígitos. Parecía no haber ningún límite a las precisiones que pudieran obtenerse en cualquier tipo de medición. Los físicos y muchos filósofos del siglo XIX daban por supuesto que, detrás de las macroleyes, con sus inevitables errores de medición, hay microleyes exactas y deterministas. Por supuesto, no es posible ver moléculas. Pero sin duda, si dos moléculas chocan, sus movimientos resultantes estarán completamente determinados por las condiciones anteriores al choque. Si fuera posible conocer todas estas condiciones, sería posible predecir exactamente cómo se comportarán las moléculas que chocan. ¿Cómo podría ser

de otra manera? La conducta de las moléculas debe depender de *algo*. No puede ser arbitraria y fortuita. Las leyes básicas de la física deben ser deterministas.

Los físicos del siglo XIX también admitían que las leyes básicas son idealizaciones raramente ejemplificadas en forma pura, debido a la influencia de factores extraños. Expresaban esta situación mediante la distinción entre leyes básicas y leyes "restringidas", que derivan de las básicas. Una ley restringida es simplemente una ley formulada con una cláusula restrictiva; por ejemplo, dirá que esto o aquello sucede solamente en "circunstancias normales". Consideremos el siguiente enunciado: "Una barra de hierro calentada desde la temperatura de congelación hasta la de ebullición del agua aumentará en longitud." Esto no es verdad si se coloca la barra en un fuerte molde que ejerza presión sobre los extremos. Si la presión es suficiente, se impedirá la dilatación de la barra. La ley es restringida, pues, en el sentido de que se entiende que sólo es válida en circunstancias normales, esto es, cuando no actúan sobre la barra otras fuerzas que perturben el experimento.

Detrás de todas las leyes restringidas están las leyes fundamentales, que hacen afirmaciones incondicionales. "Dos cuerpos se atraen con una fuerza gravitacional proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa." Este es un enunciado incondicional. Por supuesto, puede haber otras fuerzas, como la atracción magnética, que pueda modificar el movimiento de uno de los cuerpos, sin modificar la intensidad o la dirección de la fuerza gravitacional. No es necesario agregar cláusulas restrictivas al enunciado de la ley. Otro ejemplo es el de las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético. Se entendía que eran válidas incondicionalmente, con absoluta precisión. El gran cuadro que ofrecía la física newtoniana era el de un mundo en el cual todos los sucesos podían ser explicados, en principio por leyes básicas totalmente exentas de indeterminación. Como diji-

mos en un capítulo anterior, Laplace dio una formulación clásica a esta concepción al decir que una mente imaginaria que conociera todas las leyes fundamentales y todos los hechos del mundo en un instante de su historia, podría calcular todos los sucesos pasados y futuros del mundo. Como veremos en el capítulo siguiente y final, el surgimiento de la física cuántica destruyó este cuadro utópico.

XXX

EL INDETERMINISMO EN LA FÍSICA CUÁNTICA

El carácter esencialmente no determinista de la mecánica cuántica se basa en el principio de indeterminación, llamado a veces el principio de incertidumbre o la relación de incertidumbre, que fue enunciado por primera vez en 1927 por Werner Heisenberg. Dice, aproximadamente, que, con respecto a ciertos pares de magnitudes llamadas "conjugadas", es imposible en principio medir ambas al mismo tiempo con gran precisión.

Un ejemplo de un par semejante es:

(1) La coordenada x (q_x) de la posición de una partícula dada en un instante determinado (con respecto a un sistema de coordenadas dado).

(2) La componente x (p_x) de la cantidad de movimiento de la misma partícula en el mismo instante. (Esta componente es el producto de la masa de la partícula por la componente x de su velocidad.)

Lo mismo es válido para el par q_y, p_y y para el par q_z, p_z.

Supongamos que se hacen mediciones de dos magnitudes conjugadas p y q, y se halla que p está dentro de un cierto intervalo de longitud Δp y q dentro de cierto intervalo de longitud Δq. El principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que si tratamos de medir p con precisión, esto es, si hacemos muy pequeño a Δp, no podemos medir q en el mismo instante con precisión, esto es, hacer muy pequeño a Δq. Más específicamente, no es posible hacer que el producto de Δp por Δq sea menor que un cierto valor expresado en términos de la constante cuántica de Planck, h. Si

las magnitudes conjugadas son componentes de la cantidad de movimiento y de la posición, el principio de incertidumbre afirma que no es posible, en principio, medir ambas con un elevado grado de exactitud. Si sabemos exactamente dónde está una partícula, las componentes de su cantidad de movimiento se hacen brumosas. Y si sabemos exactamente cuál es su cantidad de movimiento, no podemos ubicar exactamente su posición. En la práctica, por supuesto, la inexactitud de una medición de este tipo habitualmente es mucho mayor que el mínimo establecido por el principio de incertidumbre. Pero el punto importante, cuyas implicaciones son enormes, es que tal inexactitud forma parte de las leyes básicas de la teoría cuántica. La limitación enunciada por el principio de incertidumbre no debe ser entendida como si se debiera a las imperfecciones de los instrumentos de medición y, por lo tanto, como una dificultad que puede ser resuelta mediante mejoras en las técnicas de medición. Es una ley fundamental, cuya validez persistirá mientras las leyes de la teoría cuántica mantengan su forma actual.

Esto no significa que no puedan ser modificadas las leyes aceptadas actualmente en la física ni que el principio de incertidumbre de Heisenberg nunca pueda ser abandonado. Pero creo necesario aclarar que su eliminación exigiría un cambio revolucionario en la estructura básica de la física actual. Algunos físicos están convencidos (como lo estaba Einstein) de que este aspecto de la moderna mecánica cuántica es discutible y que algún día será descartado. Es una posibilidad. Pero se trataría de una medida radical. Por el momento, nadie puede ver de qué manera podría eliminarse el principio de incertidumbre.

Una diferencia relacionada con la anterior e igualmente importante entre la teoría cuántica y la física clásica se encuentra en el concepto de estado instantáneo de un sistema físico. Consideremos, a título de ejemplo, un sistema físico consistente en un cierto número de partículas. En la

física clásica, el estado de este sistema en el tiempo t_1 quedaría completamente descrito dando para cada partícula los valores de las siguientes magnitudes (a veces llamadas "variables de estado", pero que yo llamaré "magnitudes de estado"):

(a) Las tres coordenadas de posición en t_1.
(b) Las tres componentes de la cantidad de movimiento en t_1.

Supongamos que este sistema permanece aislado durante el tiempo que trascurre entre t_1 y t_2; es decir, durante este intervalo de tiempo no lo afecta ninguna perturbación exterior. Entonces, sobre la base del estado del sistema en t_1, las leyes de la mecánica clásica determinan unívocamente su estado (los valores de todas las magnitudes de estado) en t_2.

En la mecánica cuántica, el cuadro es muy diferente. (Aquí dejaremos de lado la diferencia de naturaleza de esas partículas que son consideradas como últimas, en el sentido de ser indivisibles. En la física moderna, ya no se atribuye tal carácter a los átomos, sino a partículas más pequeñas, como los electrones y los protones. Aunque esta diferencia señala un gran paso adelante en el desarrollo reciente de la física, no es esencial para nuestro examen de los métodos formales aplicables a la especificación del estado de un sistema.) En la mecánica cuántica, un conjunto de magnitudes de estado para un sistema dado en un instante determinado es llamado "completo" si, primero, es posible en principio medir todas las magnitudes del conjunto simultáneamente y, segundo, si para cualquier otra magnitud de estado que pueda ser medida simultáneamente con todas las del conjunto, el valor de la primera está determinado por los valores de las segundas. Así, en nuestro ejemplo de una clase de partículas, un conjunto completo podría consistir en las siguientes magnitudes: para algunas de las partículas, las coordenadas q_x, q_y y q_z; para otras partículas,

las componentes de la cantidad de movimiento, p_x, p_y y p_z; para otras, p_x, q_y, p_z, o q_x, q_y, p_z; y para otras partículas aun, otros conjuntos adecuados de tres magnitudes expresadas en términos de las q y las p. Según los principios de la mecánica cuántica el estado de un sistema en un instante dado queda completamente descrito especificando los valores de cualquier conjunto completo de magnitudes de estado. Evidentemente, tal descripción sería considerada incompleta desde el punto de vista clásico, porque si el conjunto contiene a q_x, entonces p_x no está dada ni queda determinada por los otros valores del conjunto. Pero esta restricción de una descripción de estado se ajusta al principio de incertidumbre: si se conoce q_x, en principio p_x es incognoscible. Es fácil ver que hay un número enorme —en realidad infinito— de posibles elecciones diferentes de un conjunto completo de magnitudes de estado para un sistema dado. Podemos elegir libremente efectuar mediciones de las magnitudes de *uno* cualquiera de los conjuntos completos; y después de haber medido los valores exactos de las magnitudes del conjunto elegido, entonces la descripción de estado que especifica estos valores es la que podemos pretender que conocemos.

En la mecánica cuántica, todo estado de un sistema puede ser representado por una función de un tipo especial llamada "función de onda". Una función de este tipo asigna valores numéricos a los puntos de un espacio. (En general, sin embargo, no se trata de nuestro espacio tridimensional familiar, sino de un espacio abstracto de mayor número de dimensiones.) Si se dan los valores de un conjunto completo de magnitudes de estado para el tiempo t_1, la función de onda del sistema, para t_1, queda determinada unívocamente. Estas funciones de onda, si bien cada una de ellas se basa en un conjunto de magnitudes que parecería incompleto desde el punto de vista de la física clásica, desempeñan en la mecánica cuántica un papel análogo al de las descripciones de estado en la mecánica clásica. Bajo la misma

condición de aislamiento que antes, es posible determinar la función de onda para t_2 sobre la base de la función de onda dada para t_1. Se lo realiza con ayuda de una famosa ecuación llamada la "ecuación diferencial de Schrödinger", formulada por vez primera por el gran físico austríaco Erwin Schrödinger. Esta ecuación tiene la forma matemática de una ley determinista; da la función de onda completa para t_2. Por lo tanto, si aceptamos que las funciones de onda son representaciones completas de estados instantáneos, deberíamos decir que, al menos en el nivel teórico, en la física cuántica se conserva el determinismo.

Aunque algunos físicos han hecho tal afirmación, ella me parece engañosa porque podría inducir al lector a pasar por alto el hecho siguiente. Cuando preguntamos qué nos dice la función de onda calculada para el instante futuro t_2 acerca de los valores de las magnitudes de estado en t_2, la respuesta es: si nos proponemos realizar en t_2 una medición de una magnitud de estado particular —por ejemplo, la coordenada y de la posición de la partícula número 5— la función de onda no predice el valor que hallaremos en la medición; sólo suministra una distribución probabilística de los valores posibles de esta magnitud. En general, la función de onda asignará probabilidades positivas a varios valores posibles (o a varios subintervalos de valores posibles). Sólo en algunos casos especiales uno de los valores alcanza teóricamente una probabilidad de 1 (certeza), lo cual nos permite decir que este valor ha sido predicho definitivamente. Obsérvese que la función de onda calculada para t_2 suministra una distribución probabilística de los valores de *toda* magnitud de estado del sistema físico en consideración. En nuestro ejemplo anterior, esto significa que brinda distribuciones probabilísticas para todas las magnitudes mencionadas en (a) y (b). La teoría cuántica es fundamentalmente indeterminista por cuanto no suministra predicciones definidas de los resultados de las mediciones. Sólo brinda predicciones probabilísticas.

Puesto que la función de onda calculada para el tiempo t_2 ofrece distribuciones probabilísticas para las magnitudes de estado primarias con respecto a partículas individuales, es igualmente posible deducir distribuciones probabilísticas para otras magnitudes definidas en términos de las primarias. Entre estas otras magnitudes se cuentan las magnitudes estadísticas con respecto al conjunto de todas las partículas del sistema físico o a un subconjunto de estas partículas. Muchas de estas magnitudes estadísticas corresponden a propiedades macroobservables; por ejemplo, a la temperatura de un cuerpo pequeño, pero visible, o a la posición o velocidad del centro de gravedad de un cuerpo. Si el cuerpo está formado por miles de millones de partículas —por ejemplo, un satélite artificial que gire alrededor de la Tierra—, su posición, velocidad, temperatura y otras magnitudes medibles pueden ser calculadas con gran exactitud. En los casos como este, la curva de densidad probabilística de una magnitud estadística tiene la forma de una colina sumamente estrecha y empinada. Por ende, podemos especificar un pequeño intervalo que incluye prácticamente toda la colina. Como consecuencia de esto, la probabilidad de que el valor de la magnitud caiga dentro de este intervalo es muy cercana a 1. Tan cercana es a 1 que, para todos los propósitos prácticos, podemos despreciar el carácter probabilístico de la predicción y considerarla como equivalente a la certeza. Pero desde el punto de vista de la teoría cuántica, el satélite es un sistema formado por miles de millones de partículas y para cada partícula individual hay una ineludible brumosidad en las predicciones. La incertidumbre expresada por las leyes cuánticas también rige para el satélite, aunque se reduce casi a cero por las leyes estadísticas referentes a los grandes números de partículas.

Por otra parte, hay situaciones de una naturaleza muy diferente y en las cuales la aparición de un suceso es directamente observable en el sentido más fuerte, no obstante lo cual, depende de la conducta de un número de partículas

sumamente pequeño; a veces, hasta de una sola partícula. En estos casos, la considerable incertidumbre con respecto a la conducta de la partícula rige también para el macrosuceso. Esto ocurre a menudo en las situaciones en las cuales un microsuceso radiactivo "desencadena" un macrosuceso; por ejemplo, cuando un electrón emitido en una desintegración beta produce un golpecito seco claramente audible en un contador Geiger. Aun cuando hagamos la suposición ideal de que conocemos los valores de un conjunto completo de magnitudes de estado primarias de las partículas subatómicas pertenecientes a un pequeño conjunto de átomos radiactivos que constituyen el cuerpo C en el tiempo t_1, sólo podemos deducir probabilidades para la producción de sucesos como: ninguna emisión de partículas, emisión de una partícula, emisión de dos partículas, etc., dentro del primer segundo siguiente a t_1. Si el proceso es tal que la probabilidad de que no se produzca ninguna emisión en el intervalo de un segundo es cercana a 1, no podemos predecir, ni siquiera con la más tosca aproximación, el tiempo en el cual se producirá la emisión de la primera partícula y provocará un golpecito seco en el contador Geiger. Sólo podemos determinar probabilidades y valores relacionados con éstas; por ejemplo, el valor esperado del tiempo del primer ruidito.

Dada esta situación, yo diría que el determinismo del siglo XIX ha sido abandonado en la física moderna. Creo que la mayoría de los físicos actuales optarían por esta manera de expresar la radical alteración que la mecánica cuántica ha introducido en el cuadro newtoniano clásico.

Cuando algunos filósofos, como Ernest Nagel, y algunos físicos, como Henry Margenau, dicen que aún hay determinismo en las leyes acerca de los estados de los sistemas y que sólo ha cambiado la definición de "estado de un sistema", no me opongo a su afirmación. Lo que dicen realmente es cierto. Pero en mi opinión, la palabra "sólo" puede ser engañosa. Da la impresión de que el cambio consiste

meramente en ser respuesta distinta a la cuestión: ¿cuáles son las magnitudes que caracterizan el estado de un sistema? En realidad, el cambio es mucho más profundo. Los físicos clásicos estaban convencidos de que, con el progreso de la investigación, las leyes serían cada vez más exactas y que no habría ningún límite a la precisión que puede obtenerse en la predicción de sucesos observables. En contraste con esta convicción, la teoría cuántica establece un límite insuperable. Por esta razón, creo que se corre menos riesgo de provocar malentendidos si decimos que la estructura de causalidad —la estructura de las leyes— de la física moderna es fundamentalmente diferente de la que prevaleció desde la época de Newton hasta fines del siglo XIX. El determinismo en el sentido clásico ha sido abandonado.

Es fácil de comprender que esta imagen radicalmente nueva de la ley física fuera, al principio, psicológicamente difícil de aceptar para los físicos.[1] El mismo Planck, que era por naturaleza un pensador conservador, se espantó cuando comprendió que la emisión y absorción de radiación no es un proceso continuo, sino un proceso que se produce en unidades indivisibles. Este carácter discreto era tan totalmente contrario a todo el espíritu de la física tradicional que fue sumamente difícil para muchos físicos, inclusive Planck, adaptarse a la nueva manera de pensar.

La naturaleza revolucionaria del principio de incertidumbre de Heisenberg ha llevado a algunos filósofos y físicos a sugerir la introducción de ciertos cambios básicos en el lenguaje de la física. Los físicos raramente hablan

[1] Sobre este punto, recomendaré un pequeño libro de Werner Heisenberg titulado *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science* (Nueva York: Harper, 1958). Contiene una clara descripción del desarrollo histórico de la teoría cuántica, de los primeros pasos vacilantes de Planck y de las contribuciones de Einstein, Heisenberg y otros. F. S. C. Northrop señala correctamente en su introducción que Heisenberg es demasiado modesto al referirse a su propio papel en esta historia.

mucho acerca del lenguaje que usan. Tales comentarios habitualmente provienen de los pocos físicos que se interesan por la fundamentación lógica de la física o de lógicos que han estudiado física. Esas personas se preguntan: "¿Debe ser modificado el lenguaje de la física para adecuarse a las relaciones de incertidumbre? Si es así, ¿de qué manera?"

Las propuestas más extremas de tal modificación se refieren a un cambio en el tipo de lógica utilizado en la física. Philipp Frank y Moritz Schlick (este era por entonces profesor de filosofía en Viena y el primero de física en Praga) expresaron conjuntamente por vez primera la tesis de que, en ciertas condiciones, la conjunción de dos enunciados significativos de la física debe ser considerada como carente de sentido; por ejemplo, dos predicciones concernientes a los valores de magnitudes conjugadas para el mismo sistema y al mismo tiempo. Sea *A* un enunciado que predice a las coordenadas de posición exactas de una partícula en un cierto punto temporal. Sea el enunciado *B* la expresión de las tres componentes de la cantidad de movimiento de esta misma partícula en el mismo punto temporal. Por el principio de incertidumbre de Heisenberg, sabemos que sólo tenemos dos opciones:

1. Podemos hacer un experimento para determinar (siempre que dispongamos de aparatos suficientemente perfeccionados, por supuesto) la posición de una partícula con elevada, aunque no perfecta, precisión. En este caso, nuestra determinación de la cantidad de movimiento de la partícula será sumamente imprecisa.

2. Podemos realizar otro experimento para medir las componentes de la cantidad de movimiento de la partícula con gran precisión. En este caso, debemos contentarnos con una determinación muy imprecisa de la posición de la partícula.

En resumen, podemos someter a prueba a *A* o *B*. Pero no podemos someter a prueba la conjunción "*A* y *B*". Martin Strauss, un discípulo de Frank, hizo su tesis de doctorado

sobre este tema y otros relacionados con él. Posteriormente, trabajó con Niels Bohr en Copenhague. Strauss sostenía que la conjunción de *A* y *B* debe ser considerada carente de significado, porque no es confirmable. Si lo deseamos, podemos verificar *A* con la precisión que nos plazca. Podemos hacer lo mismo con *B*. Pero no podemos hacerlo con "*A* y *B*". Por lo tanto, esta conjunción no debe ser considerada un enunciado significativo. Por esta razón, sostenía Strauss, es necesario modificar las reglas de formación (reglas que especifican las formas admitidas de oraciones) del lenguaje de la física. En mi opinión, no es aconsejable tal cambio radical.

Otra sugerencia semejante fue hecha por los matemáticos Garrett Birkhoff y John von Neumann.[2] Propusieron un cambio, no en las reglas de formación, sino en las reglas de transformación (reglas por las cuales puede deducirse una oración de otra o de un conjunto de oraciones). Propusieron que los físicos abandonaran una de las leyes distributivas de la lógica proposicional.

Hans Reichenbach hizo una tercera propuesta. Sugirió el reemplazo de la lógica tradicional bivalente por una lógica trivalente.[3] En esta lógica, cada enunciado tendría uno de tres valores posibles: *V* (verdadero), *F* (falso) o *I* (indeterminado). Se reemplaza el principio clásico del tercero excluido (un enunciado es verdadero o falso, y no hay ninguna tercera posibilidad) por el principio del cuarto excluido: todo enunciado es verdadero, falso o indeterminado, y no hay ninguna cuarta alternativa. Por ejemplo, puede establecerse que el enunciado *B*, relativo a la cantidad de movimiento de una partícula, es verdadero si se realiza un experimento adecuado. En este caso, el otro enunciado, *A*, acerca de la posición de la partícula, es inde-

[2] Ver Garret Birkhoff y John von Neumann, "The Logic of Quantum Mechanics", *Annals of Mathematics*, 37 (1936), 823-843.

[3] Ver Hans Reichenbach, *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics* (Berkeley: University of California Press, 1944).

terminado. Es indeterminado porque resulta imposible, en principio, determinar su verdad o falsedad en el mismo instante en que se confirma el enunciado *B*. Por supuesto, podría haberse confirmado *A*. En tal caso, *B* sería indeterminado. En otras palabras, en la física moderna se presentan situaciones en las cuales, si ciertos enunciados son verdaderos, otros deben ser indeterminados.

Para elaborar su lógica trivalente, Reichenbach tuvo que redefinir los *conectivos lógicos comunes* (implicación, disyunción, conjunción, etc.) mediante tablas de verdad mucho más complicadas que las utilizadas para definir los conectivos de la lógica bivalento común. Además, tuvo que introducir nuevos conectivos. Nuevamente, creo que si fuera necesario complicar la lógica de esta manera para perfeccionar el lenguaje de la física, tal empresa sería aceptable. Pero, en la actualidad, no veo la necesidad de dar un paso tan radical.

Por supuesto, debemos esperar hasta ver qué sucede en el futuro desarrollo de la física. Desgraciadamente, muy pocas veces los físicos presentan sus teorías en la forma que quisieran los lógicos. No dicen: "Este es mi lenguaje, estos son los términos primitivos, he aquí mis reglas de formación y estos son los axiomas lógicos." (Si al menos presentaran sus axiomas lógicos, podríamos discernir si están de acuerdo con von Neumann o con Reichenbach, o si prefieren conservar la lógica bivalente clásica.) También sería conveniente enunciar los postulados de todo el ámbito de la física en una forma sistemática que incluya la lógica formal. Si se hiciera esto, sería más fácil establecer si existen buenas razones para cambiar la lógica subyacente.

Aquí llegamos a problemas profundos y aún no resueltos concernientes al lenguaje de la física. Excepto en su parte matemática, este lenguaje es todavía, en gran medida, un lenguaje natural; es decir, sus reglas se aprenden implícitamente en la práctica y raramente tienen formulación explícita. Naturalmente, se han adoptado miles de nuevos térmi-

nos y frases peculiares del lenguaje de la física, y en algunos casos se han establecido reglas especiales para manipular algunos de esos términos y símbolos técnicos. Como los lenguajes de otras ciencias, también el lenguaje de la física ha incrementado firmemente en exactitud y en eficiencia totales. Ciertamente, esta tendencia, se mantendrá. Pero por ahora, el desarrollo de la mecánica cuántica no se ha reflejado totalmente en un afinamiento del lenguaje de la física.

Es difícil predecir los cambios que se producirán en el lenguaje de la física. Pero estoy convencido de que hay dos tendencias, que han conducido a grandes mejoras en el lenguaje de la matemática durante el medio siglo pasado, que resultarán igualmente eficaces en el afinamiento y la clarificación del lenguaje de la física: la aplicación de la lógica moderna y la teoría de conjuntos, y la adopción del método axiomático en su forma moderna, lo cual presupone un sistema lingüístico formalizado. En la física actual, no sólo está en discusión el contenido de las teorías sino también toda la estructura conceptual de la física, ambos métodos podrían ser de enorme ayuda.

Se presenta, pues, una situación estimulante, que exige una estrecha cooperación entre físicos y lógicos; mejor aun, exige la labor de hombres más jóvenes que hayan estudiado al mismo tiempo física y lógica. Creo que la aplicación de la lógica moderna y el método axiomático a la física hará mucho más que mejorar la comunicación entre los físicos y entre éstos y otros científicos. Permitirá realizar algo de importancia mucho mayor: hará más fácil la creación de nuevos conceptos y la formulación de nuevas suposiciones. En los años recientes se ha acumulado una enorme cantidad de nuevos resultados experimentales, debido en gran parte a las fundamentales mejoras en los aparatos de experimentación, como los grandes desmenuzadores de átomos. Sobre la base de estos resultados, se han realizado grandes progresos en el desarrollo de la mecánica cuántica. Desgraciadamente, los esfuerzos por reconstruir la teoría de modo

tal que tengan cabida en ella los nuevos datos no han logrado éxito. Han aparecido algunos enigmas sorprendentes y algunas perplejidades desconcertantes. Su solución plantea una tarea urgente, pero sumamente difícil. Parece correcto suponer que el uso de nuevas herramientas conceptuales puede aportar, en este caso, una contribución esencial. Algunos físicos creen que hay buenas probabilidades de que se produzca una nueva transformación en un futuro cercano. Pero se produzca tarde o temprano, podemos confiar —siempre que los principales estadistas del mundo eludan la suprema locura de la guerra nuclear y permitan sobrevivir a la humanidad— en que la ciencia continuará realizando grandes progresos y conduciéndonos a una comprensión cada vez más profunda de la estructura del mundo.

ÍNDICE ALFABÉTICO

ÍNDICE GENERAL

CUARTA PARTE

CAUSALIDAD Y DETERMINISMO

QUINTA PARTE

LEYES TEÓRICAS Y CONCEPTOS TEÓRICOS

SEXTA PARTE

MÁS ALLÁ DEL DETERMINISMO